

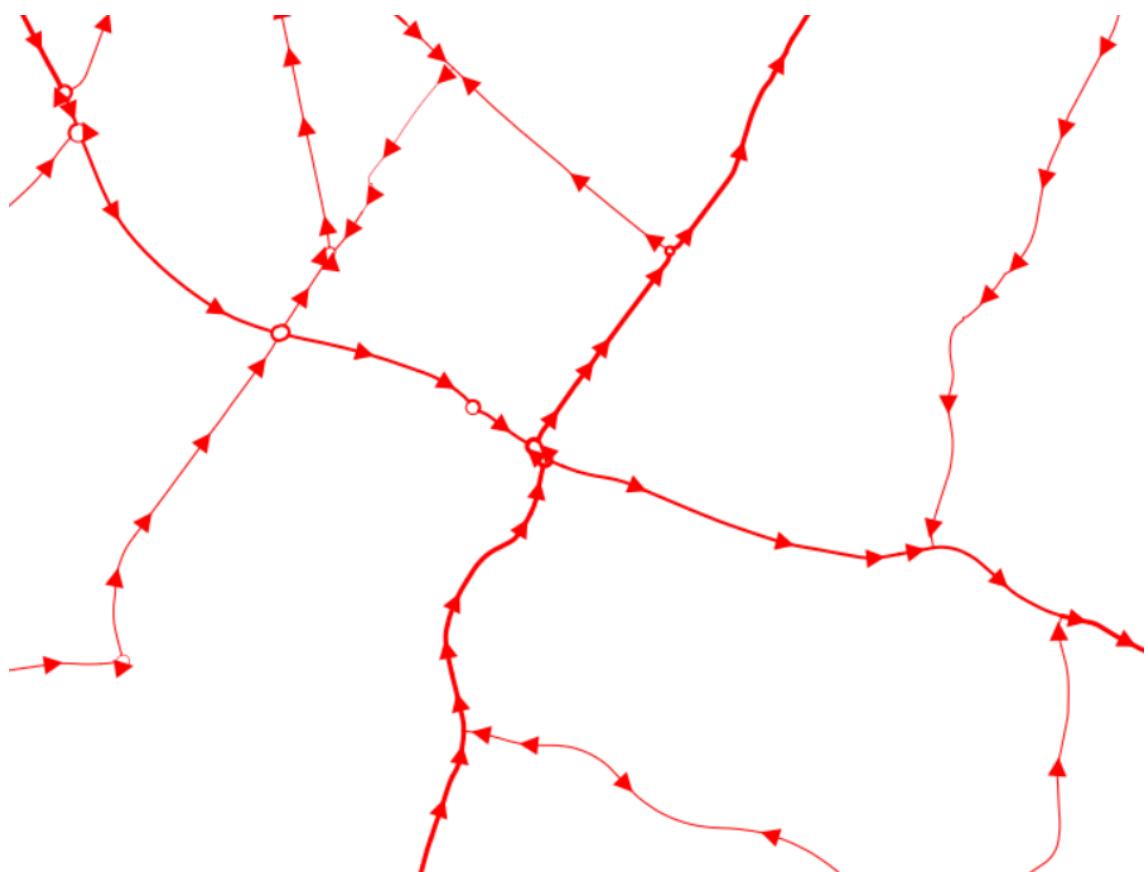
Bachelorarbeit

Bedarfsgerechte Optimierung der Veloinfrastruktur Uster

Autor: Cyrano Golliez ETH-Nr. 15-914-609

Supervisors: Prof. Dr. Bryan T. Adey
Dr. Claudio Martani

Date: 29.05.2020





Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Eigenständigkeitserklärung

Die unterzeichnete Eigenständigkeitserklärung ist Bestandteil jeder während des Studiums verfassten Semester-, Bachelor- und Master-Arbeit oder anderen Abschlussarbeit (auch der jeweils elektronischen Version).

Die Dozentinnen und Dozenten können auch für andere bei ihnen verfasste schriftliche Arbeiten eine Eigenständigkeitserklärung verlangen.

Ich bestätige, die vorliegende Arbeit selbständig und in eigenen Worten verfasst zu haben. Davon ausgenommen sind sprachliche und inhaltliche Korrekturvorschläge durch die Betreuer und Betreuerinnen der Arbeit.

Titel der Arbeit (in Druckschrift):

Bedarfsgerechte Optimierung der Veloinfrastruktur Uster

Verfasst von (in Druckschrift):

Bei Gruppenarbeiten sind die Namen aller Verfasserinnen und Verfasser erforderlich.

Name(n):

Golliez

Vorname(n):

Cyrano

Ich bestätige mit meiner Unterschrift:

- Ich habe keine im Merkblatt „[Zitier-Knigge](#)“ beschriebene Form des Plagiats begangen.
- Ich habe alle Methoden, Daten und Arbeitsabläufe wahrheitsgetreu dokumentiert.
- Ich habe keine Daten manipuliert.
- Ich habe alle Personen erwähnt, welche die Arbeit wesentlich unterstützt haben.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die Arbeit mit elektronischen Hilfsmitteln auf Plagiate überprüft werden kann.

Ort, Datum

Zürich, 29.05.2020

Unterschrift(en)

Bei Gruppenarbeiten sind die Namen aller Verfasserinnen und Verfasser erforderlich. Durch die Unterschriften bürgen sie gemeinsam für den gesamten Inhalt dieser schriftlichen Arbeit.



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Institut für
Bau- und Infrastruktur-
management



Erklärung zur Anwendungsbeschränkung von projektbezogenen Unterlagen

Ich (wir) verstehe(n), dass die projektbezogenen Unterlagen, welche mir (uns) zur Verfügung gestellt wurden (z.B. Material welches von externen Betreuungspersonen im Zusammenhang mit den technischen Aspekten des Projekts zugänglich gemacht wurde, projektspezifische Daten, Graphiken, Kalkulationen, etc.) vertraulich zu behandeln sind und nur für meine (unsere) Verwendung im Zusammenhang mit meinem (unserem) Projekt mit dem Institut für Bau- und Infrastruktur (IBI) bestimmt sind. Ich (wir) darf (dürfen) das Material weder ganz noch auszugsweise in irgendeiner Form an Drittparteien weitergeben oder dieses nach Beendigung des Projekts ohne ausdrückliche Bewilligung des IBI weiterverwenden.

Name des Projekts:

Improving Uster to accommodate the future needs

Semester: HS FS Jahr: 2020

Name und Unterschrift des (der) Studierenden*:

Cyrano Golliez

Ort und Datum: Zürich, 29.05.2020

*Bei Gruppenprojekten ist der Name und die Unterschrift von allen Gruppenmitgliedern erforderlich

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich während der Ausführung dieser Bachelorarbeit unterstützt haben. So möchte ich Prof. Dr. Bryan T. Adey danken, dass er mich diese Bachelorarbeit hat durchführen lassen und Herrn Dr. Claudio Martani für die grossartige Unterstützung während des gesamten Prozesses meiner Arbeit, die lehrreichen Diskussionen und die hilfreichen Rückmeldungen.

Abstract

The aim of this project was to optimize the transport system of Uster by improving a section of the bicycle infrastructure. Therefore the infrastructure of the level crossing Brunnenstrasse as a function of uncertain future demand relations and developed various proposals for improving the situation has been investigated. From this, an optimal variant was derived, which can best satisfy the future mobility needs of the population of Uster.

The optimization of existing infrastructure systems is one of the major challenges of the future of infrastructure management. In most cases, it is not possible to clearly determine what exactly the problems are and what causes them. On the other hand, it is not always completely clear what is to be achieved by a change. In addition, it is not always clear which variant of an optimization is possible at all and which is optimal, taking into account uncertain future developments of the costs and benefits of those involved.

The needs and requirements of the users and owners of the infrastructure can change drastically during its lifetime. The difficulty is therefore to design infrastructure in such a way that it can guarantee an adequate level of performance throughout its life cycle. It is in the general interest that any intervention in existing infrastructure should only be undertaken if the net benefit to all parties involved is maximised.

Within the scope of this project, I have worked out different variants for the existing traffic problems of Uster and determined an optimal solution. In doing so, I drew on the problem-solving process from the Systems Engineering course and on the theory of the objective function, the decision tree and sensitivity analyses. In order to allow the uncertainties of future developments to flow into the decision-making process, the corresponding influencing factors were estimated using forecasts. Subsequently, the influence of various parameter variations on the cost calculation was modelled and the values determined were weighted with the estimated probability of the scenarios occurring. On this basis, the variants available for selection were assessed. Variant 2 proved to be the best option for the future of Uster.

Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war die Optimierung des Verkehrssystems von Uster durch Verbesserung eines Teilstücks der Veloinfrastruktur. Dazu wurde die Infrastruktur des Bahnübergangs Brunnenstrasse in Abhängigkeit von unsicheren zukünftigen Nachfragebeziehung untersucht und verschiedene Vorschläge zur Verbesserung der Situation erarbeitet. Daraus wurde eine optimale Variante abgeleitet, welche die zukünftigen Bedürfnisse der Bevölkerung von Uster nach Mobilität am besten befriedigen kann.

Die Optimierung bestehender Infrastruktursystem stellt eine der grossen Herausforderungen des Infrastruktur Management dar. So ist in den meisten Fällen einerseits nicht eindeutig zu bestimmen, was genau die Probleme sind und durch was sie verursacht werden. Andererseits ist nicht immer vollständig festgelegt, was mit einer Veränderung erreicht werden soll. Hinzu kommt, dass nicht immer ersichtlich ist, welche Varianten einer Optimierung überhaupt möglich sind und welche unter Berücksichtigung unsicherer zukünftiger Entwicklungen der Kosten und Nutzen der Beteiligten optimal ist.

Die Bedürfnisse und Anforderungen der Nutzer und Besitzer der Infrastruktur können sich während der Lebensdauer drastisch verändern. Die Schwierigkeit ist daher, Infrastrukturen so zu gestalten, dass sie über ihre gesamte Lebensdauer ein angemessenes Leistungsniveau gewährleisten können. Es ist von allgemeinem Interesse, dass eine Intervention in eine bestehende Infrastruktur nur dann durchgeführt wird, wenn der Netto-Nutzen aller Beteiligten maximiert wird.

Im Rahmen dieser Projektarbeit habe ich für die bestehende Verkehrsproblematik von Uster verschiedene Varianten erarbeitet und eine optimale Lösung bestimmt. Dabei habe ich mich auf den Problemlösungsprozess aus dem Kurs Systems Engineering sowie auf die Theorie der Zielfunktion, des Entscheidungsbaumes und der Sensitivitätsanalysen gestützt. Um die Unsicherheiten zukünftiger Entwicklungen in den Entscheidungsprozess einfließen zu lassen, wurden die entsprechenden Einflussfaktoren anhand von Prognosen geschätzt. Anschliessend wurde der Einfluss verschiedener Parametervariationen auf die Kostenberechnung modelliert und die ermittelten Werte mit der geschätzten Eintrittswahrscheinlichkeit der Szenarien gewichtet. Auf dieser Basis wurden die zur Auswahl stehenden Varianten beurteilt. Dabei hat sich die Variante 2 als die beste Option für die Zukunft von Uster herausgestellt.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	vii
Abstract	ix
Zusammenfassung	xi
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Theorie	3
2.1 Problemlösungsprozess	3
2.2 Interessensgruppen	5
2.3 Zielfunktion	5
2.4 Entscheidungsbaum	7
2.5 Sensitivitätsanalyse	8
2.6 Real Option Methodology	9
3 Vorgehen und Methodik	10
4 Fallstudie	12
4.1 Formulierung der Ziele und Rahmenbedingungen	17
4.1.1 Interessensgruppen	17
4.1.2 Zielfunktion	19
4.2 Kostenstruktur	20
4.2.1 Unsichere Einflussfaktoren	31
4.3 Generierung möglicher Lösungen	32
4.3.1 Variante: 1	32
4.3.2 Variante: 2	34
4.3.3 Variante: 3	36
4.4 Analyse der Lösungen	38
4.4.1 Modellierung des DTV	38
4.4.2 Berechnung der Kosten der Varianten	43
4.5 Bewertung der Lösungen	44
4.5.1 Berechnung der Risiken der Varianten	44
4.5.2 Sensitivitätsanalyse	45
5 Resultate	48
6 Diskussion	50
7 Schlussfolgerung und Ausblick	55

Inhaltsverzeichnis

Literaturverzeichnis	58
Glossar	61
Anhang	62
A.1 DTV Modellierung	62
A.2 Kostenberechnung der Varianten	62

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schritte des Problemlösungsprozesses	3
2.2	Beispiel Entscheidungsbaum	8
4.1	Strassenprojekte Uster	15
4.2	Velonetz Alltag	15
4.3	Bahnübergang Brunnenstrasse	16
4.4	Marktanteil E-Autos	27
4.5	Übersicht Variante 1	32
4.6	Querschnitt Variante 1	33
4.7	Übersicht Variante 2	34
4.8	Querschnitt Variante 2	35
4.9	Übersicht Variante 3	36
4.10	Querschnitt Variante 3	37
4.11	Szenarienübersicht	38
4.12	DTV Brunnenstrasse	41
4.13	Kostenberechnung	43
4.14	Risikoberechnung	44
4.15	Marktanteil E-Autos - Parameterauswahl 1	45
4.16	Szenarienübersicht - Parameterauswahl 3	46
5.1	Risikovergleich Grundzustand	48
5.2	Risikovergleich der Parameterauswahl 1, 2 und 3	49
5.3	Risikovergleich Parameterauswahl 4	49
6.1	Kostenvergleich Grundzustand	50
6.2	Unfallkostenvergleich: Grundzustand und Parameterauswahl 2	51
6.3	Szenarienvergleich im Grundzustand	52
6.4	Szenarienvergleich Parameterauswahl 3	52
6.5	Reisezeitkostenvergleich Grundzustand und Parameterauswahl 4	53
6.6	Reisezeitkostenvergleich Variante 2 und 3 Parameterauswahl 4	54
7.1	Entscheidungsprozess der Stadt Uster	57
A.1	Berechnung des DTV SB1/SU1-3	63
A.2	Berechnung des DTV SB2/SU1-3	64
A.3	Berechnung des DTV SB3/SU1-3	65
A.4	Kostenberechnung Variante 1 - SB1/SU1	66
A.5	Kostenberechnung Variante 1 - SB1/SU2	67
A.6	Kostenberechnung Variante 1 - SB1/SU3	68
A.7	Kostenberechnung Variante 1 - SB2/SU1	69

Abbildungsverzeichnis

A.8 Kostenberechnung Variante 1 - SB2/SU2	70
A.9 Kostenberechnung Variante 1 - SB2/SU3	71
A.10 Kostenberechnung Variante 1 - SB3/SU1	72
A.11 Kostenberechnung Variante 1 - SB3/SU2	73
A.12 Kostenberechnung Variante 1 - SB3/SU3	74
A.13 Kostenberechnung Variante 2 - SB1/SU1	75
A.14 Kostenberechnung Variante 2 - SB1/SU2	76
A.15 Kostenberechnung Variante 2 - SB1/SU3	77
A.16 Kostenberechnung Variante 2 - SB2/SU1	78
A.17 Kostenberechnung Variante 2 - SB2/SU2	79
A.18 Kostenberechnung Variante 2 - SB2/SU3	80
A.19 Kostenberechnung Variante 2 - SB3/SU1	81
A.20 Kostenberechnung Variante 2 - SB3/SU2	82
A.21 Kostenberechnung Variante 2 - SB3/SU3	83
A.22 Kostenberechnung Variante 3 - SB1/SU1	84
A.23 Kostenberechnung Variante 3 - SB1/SU2	85
A.24 Kostenberechnung Variante 3 - SB1/SU3	86
A.25 Kostenberechnung Variante 3 - SB2/SU1	87
A.26 Kostenberechnung Variante 3 - SB2/SU2	88
A.27 Kostenberechnung Variante 3 - SB2/SU3	89
A.28 Kostenberechnung Variante 3 - SB3/SU1	90
A.29 Kostenberechnung Variante 3 - SB3/SU2	91
A.30 Kostenberechnung Variante 3 - SB3/SU3	92

Tabellenverzeichnis

4.1	Tabelle der Interessensgruppen und Kostenstrukturen	19
4.2	Bau- und Wartungskosten	21
4.3	Übersicht der Nutzerkosten	24
4.4	Übersicht der Umweltkosten	26
4.5	Tabelle der Unfallrisiken	29
4.6	Übersicht der Unfallkosten	30
4.7	Basis Informationen der Varianten	37
4.8	Tabelle der Unfallrisiken - Parameterauswahl 2	46

1 Einleitung

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit im Bereich Infrastruktur Management habe ich geeignete Verfahren und Methoden zur Erarbeitung kreativer Lösungsansätze auf die Verkehrsproblematik von Uster angewendet.

Die Optimierung bestehender Verkehrssystem in städtischen Gebieten stellt eine grosse Herausforderung dar, da die zukünftige Veränderung der Nachfrage nach Mobilität einerseits in der Erarbeitung und andererseits in der Analyse und der Bewertung von möglichen Lösungsvarianten berücksichtigt werden muss. So sind bei der Planung von Strasseninfrastrukturen die aktuelle Ausgangslage sowie die wahrscheinlichsten zukünftigen Szenarien zu berücksichtigen, damit die Infrastruktur die Interessen aller Beteiligten über einen angemessenen Zeitraum befriedigen kann.

Da Infrastrukturen über einen sehr langen Zeitraum bestehen, muss eine Interventionen in ein bestehendes System zukunftsorientiert sein und die Gesamtkosten aller beteiligten Personen über diesen Zeitraum minimieren. Infolge dessen muss man, um eine Intervention zu erarbeiten die zukünftigen Einflüsse auf die Infrastruktur anhand von Prognosen modellieren. Die Anforderungen der Nutzer und Besitzer der Infrastruktur können sich während der Lebensdauer einer Infrastruktur aufgrund verschiedener Einflussfaktoren, wie zum Beispiel der Implementierung neuer Technologien oder dem Bevölkerungswachstum, drastisch verändern. So ist zum Beispiel ungewiss ob die Nachfrage nach Mobilität über den betrachteten Zeitraum steigt oder sinkt.

Das Modellieren dieser Einflüsse auf die Situation muss einerseits mit grösster Sorgfalt geschehen. Andererseits ist dies nur mit einer gewissen Unsicherheit möglich, was bei der Bestimmung der optimalen Intervention berücksichtigt werden muss. Eine optimale Variante in Anbetracht der unsicheren zukünftigen Gegebenheiten zu erarbeiten, ist das Ziel dieser Projektarbeit.

Das sternförmige Strassennetz von Uster hat zur Folge, dass die Verkehrsnetze insbesondere in Hauptverkehrszeiten überlastet sind. Hinzu kommt die mittig durch die Stadt führende Bahnlinie, welche die Stadt zerschneidet und aufgrund der langen Schliesszeit der Bahnschranken von bis zu 40'/h lange Wartezeiten an den Bahnübergängen verursacht.

Um Uster nachhaltig zu verbessern, habe ich die in dieser Arbeit vorgestellten Lösungsansätze generiert, indem ich dem Ablauf des Problemlösungsprozesses folgte. Dieser systematische Prozess erlaubt es, jede Art von Problem zu lösen. Durch die Optimierung der Zielfunktion wird die beste Variante ermittelt. Mithilfe des Entscheidungsbaumes wird der Bewertungs- und Entscheidungsprozess graphisch dargestellt. Mithilfe der Sensitivitätsanalyse der rechten Seite der Zielfunktion wird die optimale Lösung, auf ihre Belastbarkeit überprüft.

1 Einleitung

Die von mir erarbeitet Variante 2, stellt nach dem durchgeföhrten Risikovergleich die optimale Variante über den betrachteten Zeitraum von vierzig Jahren dar. Die durchgeföhrten Sensitivitätsanalysen bestätigen die getroffene Wahl. Somit wird durch den Bau der Variante 2 die Zukunft von Uster optimal und nachhaltig verbessert sowie der Nutzen aller Beteiligten erhöht.

2 Grundlagen und Theorie

Diese theoretischen Grundlagen sind anhand der Unterrichtsmaterialien des Kurses System Engineering HS 2019 von Prof. Dr. Bryan T. Adey, Dr. Craig Richmond und Dr. Clemens Kielhauser, erarbeitet worden. Der Grossteil der Informationen beziehe ich aus dem Skript zum Kurs. Zur weiteren Vertiefung habe ich die von Dr. Claudio Martani zur Verfügung gestellten Materialien zur Anwendung der *Real Option Methodology* konsultiert.

2.1 Problemlösungsprozess

Der Problemlösungsprozess ist eine universell einsetzbare Methodik zur Bestimmung der optimalen Lösung eines Problems. Anhand dieses systematischen Prozesses kann gewährleistet werden, dass bei der Optimierung eines Systems alle Aspekte zum richtigen Zeitpunkt berücksichtigt werden. So wird sichergestellt, dass die Bedürfnisse der vom betrachteten System abhängigen Personen befriedigt werden und die Funktionalität der erarbeiteten Lösungsvarianten gewährleistet ist. (Adey et al. 2019)

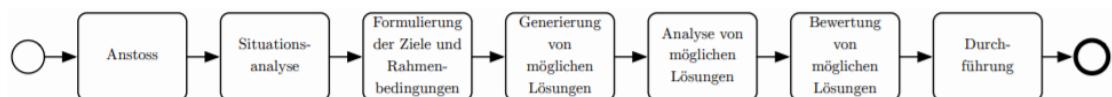


Abbildung 2.1: Schritte des Problemlösungsprozesses aus (Adey et al. 2019)

Nachfolgend werden die in Abbildung 2.1 dargestellten Schritte des Problemlösungsprozesse anhand des Skript des Kurses System Engineering, kurz erläutert.

Anstoß Im ersten Schritt werden die Grenzen und wirkenden Mechanismen des Problemfeldes identifiziert, ein allgemeines Verständnis für das Problem entwickelt und überprüft ob das richtige Problem angegangen wird. Dies erfolgt anhand der Differenzierung zwischen Wunsch und Wirklichkeit und der Bestimmung des Umfangs der Bedürfnisse nach einer geänderten Situation.

Situationsanalyse Der Zweck einer Situationsanalyse ist einerseits, die Basis für die Konkretisierung der Ziele zu schaffen und andererseits das Problem und die Notwendigkeit einer Intervention zu identifizieren. Weiter sollen die Zusammenhänge zwischen den Ursachen und dem Problem untersucht werden. Dies erfolgt mit der strukturierten Abgrenzung des Problemfeldes und einer detaillierten Darstellung der Ausgangssituation sowie der Aufgabenstellung. Anhand der Begrenzung des Problemfeldes auf den Bereich des Systems, der

2 Grundlagen und Theorie

im Rahmen der Problemlösung optimiert werden soll, und der geschaffenen Informationsbasis können die nachfolgenden Schritte durchgeführt werden. Wichtige in diesem Schritt, für die erfolgreiche Optimierung einer Problemstellung ist die Bestimmung der Diskrepanz zwischen Wunsch und Wirklichkeit.

Formulierung der Ziele und Rahmenbedingungen In diesem Schritt werden alle Ziele, Wünsche und Absichten der beteiligten Personen zusammengetragen und ausführlich beschrieben, was und in welchem Umfang erreicht werden soll. Diese Beschreibung soll möglichst vollständig, realistisch und objektiv sowie präzise und verständlich formuliert sein. Außerdem muss bei der Formulierung darauf geachtet werden, dass die Erfüllung der Ziele feststellbar und das Setzen von Prioritäten möglich ist.

Generierung von möglichen Lösungen Unter diesem Stichpunkt werden mögliche Lösungen für die Erfüllung der Ziele generiert. In einem ersten Schritt wird das neu zu gestaltende Objekt genauer untersucht und anschliessend werden erste Lösungsideen entworfen. In einem zweiten Schritt werden alle als untauglich erachteten Lösungsideen aussortiert und die verbleibenden möglichen Lösungsvarianten ausgearbeitet. Das Konkretisierungsniveau der Varianten soll der Planungsphase entsprechen, in der sich das Projekt befindet. Dieser Schritt erfordert viel Kreativität, da mit einem vertretbaren Aufwand eine Visualisierung und Beschreibung der Varianten erschaffen werden muss, mit der ein neutraler Betrachter das angewandte Konzept, mit dem das Problem gelöst werden soll, erkennen kann.

Analyse von möglichen Lösungen In dieser Phase des Problemlösungsprozess, werden die Lösungsvarianten auf allfällige Schwachstellen überprüft. Dieser Schritt ist insofern sehr wichtig, da er aufzeigt, ob ein Lösungskonzept den gestellten Anforderungen entspricht. Dies erfolgt durch die Überprüfung der Varianten in Hinblick auf die Erfüllung aller Rahmenbedingungen und Ziele.

Bewertung von möglichen Lösungen Die Bewertung der Lösungen dient dazu, die am besten geeignete Variante zu ermitteln. Durch das systematische Vergleichen der Lösungsvarianten, wird eine objektive Entscheidungsfindung ermöglicht. Eine solche Entscheidungsfindung wird mithilfe von Entscheidungsbäumen dargestellt.

Durchführung Die Durchführung schliesst den Problemlösungsprozess ab und beinhaltet die Ausführung der Variante, die im Bewertungsprozess als die Beste identifiziert wurde. Die Durchführung ist abhängig von der Phase, in der sich das Projekt befindet. Dies kann z.B. der Start einer Detailstudie (nach der Vorstudie) oder den Bau der Lösungsvariante (nach der Detailstudie), bedeuten.

2.2 Interessensgruppen

Als Interessensgruppen werden die Einzelpersonen, Gruppen oder Organisationen definiert, die von einer Veränderung der öffentlichen Infrastruktur betroffen sind. Die Interessensgruppen können in zwei Stufen unterteilt werden. Die erste Stufe umfasst die Interessensgruppen, deren Netto-Nutzen maximiert werden soll. Dies beinhaltet zum einen die Besitzer der Infrastruktur und die Nutzer sowie die direkt und indirekt betroffene Öffentlichkeit. Im Falle der zwei letztgenannten Interessensgruppen ist die Zuteilung von der Zeit abhängig. So kann eine Person beim Befahren der Infrastruktur ein Nutzer und zuhause in seiner an die Infrastruktur angrenzenden Liegenschaft, Teil der direkt betroffenen Öffentlichkeit sein. Die zweite Stufe umfasst die Interessensgruppen, die von der Maximierung des Netto-Nutzens der Interessensgruppen der ersten Stufe beeinflusst werden. Diese werden, sofern sie nicht Teil einer Interessensgruppe der ersten Stufe sind, nicht weiter berücksichtigt oder nur falls dies explizit gefordert wird. (Adey, Burkhalter und Martani 2019)

2.3 Zielfunktion

Um die optimale Lösung zu bestimmen, können im Problemlösungsprozess mathematische Modelle verwendet werden. Viele der verwendeten Modelle zur Optimierung von Problemen haben eine einheitliche Aufbau aus einer Zielfunktion, die es zu maximieren oder minimieren gilt, sowie aus Nebenbedingungen, die die Grenzen der Varianten definieren. Die Zielfunktion sowie die Nebenbedingungen können linear oder nichtlinear sein. Bei der Analyse von Varianten ist ein sogenanntes Lineares Programm (LP) mit einer linearen Zielfunktion und lineare Nebenbedingungen äusserst hilfreich, das dieses mit dem Computer einfach zu berechnen ist.

Mit einem allgemeinen LP-Problem wird die Maximierung oder Minimierung der Zielfunktion, bei welcher die Beziehung zwischen linker und rechter Seit der Nebenbedingung beliebige Formen annehmen kann, ermöglicht. (Adey et al. 2019)

Nach (Adey et al. 2019) erfolgt die Darstellung einer Zielfunktion gemäss Formel 2.1.

$$\text{Maximiere : } Z = c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2 + c_3 \cdot x_3 + \dots + c_n \cdot x_n \quad (2.1)$$

mit:

- c_j = Gewinn für jede Einheit der j-ten Aktivität
- x_j = Ausmass der j-ten Aktivität oder Entscheidung
- $j\{1\dots n\}$ = Index der Aktivitäten oder Entscheidungen

Nebenbedingungen

Gemäss (Adey et al. 2019) sind die Nebenbedingungen der Versuch, die Rahmenbedingungen mathematisch auszudrücken. Sie repräsentieren die Anzahl an Einheiten der Ressource i, die in allen Aktivitäten n konsumiert werden können. Die Nebenbedingungen werden wie folgt dargestellt:

$$\begin{aligned}
 a_{1,1} \cdot x_1 + a_{1,2} \cdot x_2 + a_{1,3} \cdot x_3 + \cdots + a_{1,n} \cdot x_n &\leq b_1 \\
 a_{2,1} \cdot x_1 + a_{2,2} \cdot x_2 + a_{2,3} \cdot x_3 + \cdots + a_{2,n} \cdot x_n &\leq b_2 \\
 &\vdots \\
 a_{m,1} \cdot x_1 + a_{m,2} \cdot x_2 + a_{m,3} \cdot x_3 + \cdots + a_{m,n} \cdot x_n &\leq b_m
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

mit:

- $a_{i,j}$ = Koeffizient der j-ten Aktivität in der i-ten Nebenbedingung
- x_j = Ausmass der j-ten Aktivität oder Entscheidung
- b_i = Verfügbare Menge der Ressource i
- $i\{1 \dots m\}$ = Index der Ressourcen
- $j\{1 \dots n\}$ = Index der Aktivitäten oder Entscheidungen

Nichtnegativitätsbedingungen

Gemäss (Adey et al. 2019) verhindern Nichtnegativitätsbedingungen, dass negative Werte im Ergebnis vorkommen. Dies bedeutet, dass Aktivitäten nur mit einem positiven Mass oder gar nicht durchgeführt werden dürfen. Für jede Art von Ressource, die in einer Gruppe von Aktivitäten konsumiert wird, d.h. für $i = 1, 2, \dots, m$ müssen diese Nebenbedingungen definiert werden.

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, x_3 \geq 0, \dots, x_n \geq 0 \tag{2.3}$$

2.4 Entscheidungsbaum

In einem Entscheidungsbaum werden alle Möglichkeiten, Entscheidungen und berücksichtigten Varianten des Entscheidungsprozess dargestellt. Dies soll es dem Betrachter ermöglichen, nachzuvollziehen wieso eine Entscheidung getroffen wurde. Damit man die Ergebnisse des Entscheidungsbaumes vergleichen kann, müssen einerseits die Unsicherheiten der betrachteten Szenarien bekannt sein und andererseits die Bewertung der Varianten anhand einer einheitlichen Skalierung erfolgen.

Ein Entscheidungsbaum besteht aus fünf Grundelementen, die nachfolgend anhand (Adey et al. 2019) kurz erläutert werden.

Kosten bzw. Nutzen stellen dar, was für die Entscheidung relevant ist. Um den Erwartungswert eines Szenario berechnen zu können, müssen alle die gleiche Masseinheit habe.

Wahrscheinlichkeiten liegen immer zwischen 0 und 1, und stellen dar wie wahrscheinlich das Eintreten einer Möglichkeit ist. Der mit der Wahrscheinlichkeit gewichtete Wert, ist somit stets kleiner oder gleich dem ursprünglichen Wert.

Entscheidungsknoten sind durch quadratische Kästchen gekennzeichnet, an welchen der Entscheidungsträger aus verschiedenen Varianten auswählen muss. An diesen Verzweigungen beeinflusst der Entscheidungsträger den Entscheidungsprozess mit der Wahl einer Variante. Der Wert eines Entscheidungsknotens wird aus der Summe aller eingehenden Zweige gebildet.

Möglichkeitsknoten stellen Verzweigungen dar, bei denen unsicher ist, welches Szenario eintreten wird. Sie werden mit einem Kreis dargestellt, wobei die vom Kreis ausgehenden Linien die möglichen Szenarien darstellen. Diese Szenarien kann der Entscheidungsträger nicht beeinflussen. Der Erwartungswert eines Möglichkeitsknoten ist die Summe der wahrscheinlichkeitsgewichteten Werte der verschiedenen Möglichkeiten eines Knoten. Folgen zwei Möglichkeitsknoten aufeinander, ergibt sich am Ende des Pfades ein Kombination der Szenarien. Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines kombinierten Szenarios berechnet sich aus der Multiplikation der Wahrscheinlichkeiten entlang des Pfades.

Blätter symbolisieren durch ein gekipptes gleichseitiges Dreieck das Ende eines Pfades. An dieser Stelle werden die Gesamtkosten bzw. -nutzen eines möglichen Szenarios eingetragen.

2 Grundlagen und Theorie

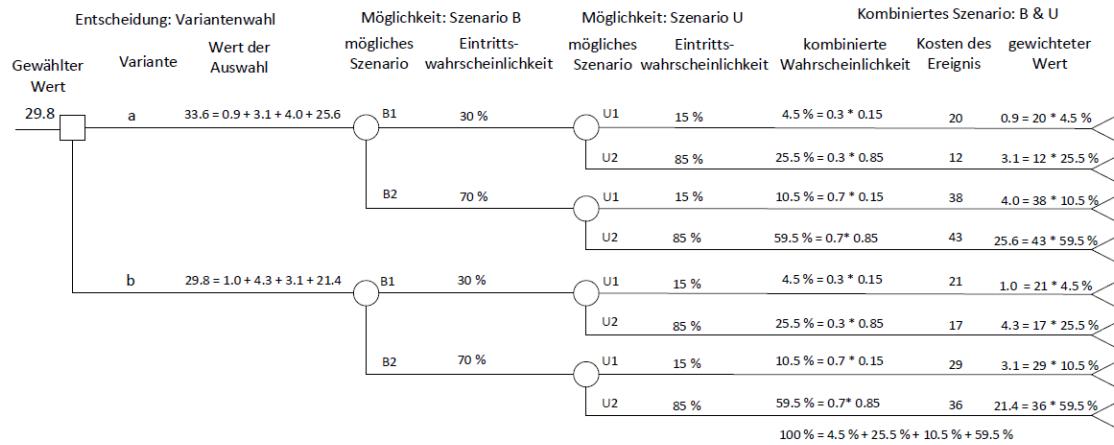


Abbildung 2.2: Beispiel eines Entscheidungsbaumes

Die Abbildung 2.2 zeigt ein fiktives Beispiel eines Entscheidungsbaumes im Rahmen einer Variantenwahl. Gesucht wird die Variante, welche die geringsten zu erwartenden Kosten und somit das kleinste Risiko generiert. Die Berechnung der Kosten erfolgt in diesem Beispiel von rechts nach links, wobei der zeitliche Verlauf der Entscheidungssituation von links nach rechts dargestellt wird.

2.5 Sensitivitätsanalyse

Ein wichtiger Bestandteil der Kosten-Nutzen Analyse ist, mithilfe einer Sensitivitätsanalyse zu untersuchen, wie stark ein Ergebnis von den getroffenen Annahmen abhängt und wie robust das Ergebnis auf eine Variation der Parameter reagiert.

Die Sensitivitätsanalyse kann sowohl mit den Nebenbedingungen als auch mit der Zielfunktion durchgeführt werden. In beiden Fällen wird untersucht, was bei einer Veränderung der ursprünglichen Annahmen passiert und in welchem Rahmen die Parameter verändert werden können, ohne dass sich das ursprüngliche Ergebnis verändert. (Adey et al. 2019)

2.6 Real Option Methodology

Die *Real Option Methodology* ist ein Vorgehen, um die optimale Variante einer Intervention unter Berücksichtigung von unsicheren zukünftigen Gegebenheiten zu bestimmen. Sie ermöglicht es, Varianten einer Infrastruktur Intervention zu erarbeiten, die auf zukünftige veränderliche Rahmenbedingungen ausgerichtet sind. So kann das Einbeziehen von flexiblen Designs im Prozess einer Infrastrukturintervention zusätzliche Vorteile generieren sowie zukünftige Risiken beseitigen. (Neufville und Scholtes 2011)

Infrastrukturen sollten über einen längeren Zeitraum hinweg ihre Serviceleistung auf einem angemessenen Niveau erbringen können. Dies setzt voraus, dass sich die Infrastruktur an veränderliche Bedingungen anpassen und die Bedürfnisse der Interessensgruppen über einen längeren Zeitraum erfüllen kann. Mit dieser Methodik kann unter Berücksichtigung von unsicheren Variablen, wie zum Beispiel der Veränderung der Anzahl Nutzer oder der Baukosten, ermittelt werden, welches Design den Netto-Nutzen des Investors maximiert. (Esders, Morte und Adey 2015)

3 Vorgehen und Methodik

Um eine Verbesserung der Verkehrssituation in Uster zu erreichen, müssen die unsicheren zukünftigen Gegebenheiten in der Generierung der Lösungsvarianten berücksichtigt werden. Eine optimale Variante zu erarbeiten, erfordert ein systematisches Vorgehen. Für das Bearbeiten der Problemstellung habe ich die Schritte und Überlegungen des Problemlösungsprozesses und der Real Option Methodology verwendet. Die nachfolgende Beschreibung, fast mein Vorgehen kurz zusammen.

Zur Bestimmung der Systemgrenzen wird eine Situationsanalyse durchgeführt. Mit dieser wird zum einen die Infrastruktur und zum anderen der Zeithorizont über den die Intervention untersucht wird, ermittelt. Zusätzlich werden die Faktoren, welche die zukünftigen Gegebenheiten in Uster am stärksten beeinflussen, definiert. Dies geschieht unter Berücksichtigung der momentanen Situation und der Annahmen, wie Uster in Zukunft funktionieren wird. Die Analyse schafft die Basis für die Formulierung der Ziele, welche in einem nächsten Schritt festgelegt werden.

Die Ziele legen fest, was mit der Intervention erreicht werden soll. Um zu bestimmen, was effektiv erreicht werden soll, müssen die betroffenen Parteien und ihre Bedürfnisse definiert werden. Für diese sogenannten Interessensgruppen werden alle relevanten Kosten ermittelt. Anhand dieser Kosten wird in einem nächsten Schritt die zu optimierende Zielfunktion definiert. Dann werden die relevanten Kosten definiert und die wichtigsten Einflussfaktoren, deren zukünftige Entwicklung ungewiss ist, bestimmt.

Die nächste Phase umfasst das kreative Erschaffen von möglichen Lösungsvarianten, welche unter Berücksichtigung der jetzigen Situation erschaffen, werden. Um die optimale Variante bestimmen zu können, müssen diese analysiert, bewertet und verglichen werden. Dazu wird in einem ersten Schritt der Effekt der als unsicher definierten Einflussfaktoren, anhand von Szenarien modelliert. Um die Lösungsvorschläge unter dem Einfluss der verschiedenen Szenarien untersuchen zu können, müssen die Wahrscheinlichkeiten definiert werden, nach welcher ein Szenario eintreten wird.

Der letzte Schritt zu Bestimmung der optimalen Variante beinhaltet die Bewertung der Lösungen. In dieser Phase wird mithilfe des Entscheidungsbaums das jeweilige Risiko der Varianten ermittelt. Um aufzuzeigen, wie die Veränderung der Parameter der Kostenstruktur das Ergebnis beeinflusst sowie um zu untersuchen, inwiefern sich das Ergebnis ändert, wenn die geschätzte Eintrittswahrscheinlichkeit der Szenarien variiert, wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Eine Sensitivitätsanalyse erfolgt jeweils nur für einen Parameter, um deutlicher aufzeigen zu können, welchen Effekt diese Veränderung auf den Entscheidungsprozess hat.

Mit dem hier vorgestellten Vorgehen wird im Rahmen dieser Projektarbeit eine optimale Lösungsvariante zur Verbesserung der Verkehrssituation in Uster aufgezeigt. Nach dem Betrachten der zur Verfügung gestellten Literatur komme ich zum Schluss, dass eine solche Untersuchung bisher so noch nicht durchgeführt wurde. In den betrachteten Arbeiten wird jeweils nur ein Objekt hinsichtlich Flexibilität des Designs auf unsichere zukünftige Gegebenheiten untersucht. Das Bearbeiten eines gesamten Infrastruktursystems mit mehreren, sich gegenseitig beeinflussenden Komponenten wie zum Beispiel verschiedenen Verkehrsteilnehmern, Fussgängerzonen sowie Grün- und Parkanlagen, ist meines Erachtens, so noch nicht durchgeführt worden.

4 Fallstudie

Uster ist die drittgrösste Stadt im Kanton Zürich und liegt östlich des Greifensees. Mit dem Bau des S-Bahnnetz 1990 hat die ehemalige aus mehreren Dörfern zusammen gewachsene Industriestadt eine Entwicklung zur Wohn- und Arbeitsstadt durchlaufen. Aufgrund der angrenzenden Waldstücke und der Nähe zum Greifensee hat Uster einen hohen Freizeit- und Erholungswert. Die Entwicklung der Stadt aus mehreren Dörfern heraus hat zur Folge, dass viele Einkaufsmöglichkeiten sowie Arbeitsplatzstandorte dezentral verteilt sind. Diese historisch bedingte Verteilung sowie die verschiedenen Standortqualitäten haben zu unterschiedlich geprägten Stadtteilen geführt. Da keine Erweiterung des Siedlungsgebietes vorgesehen ist, wird ein weiteres Wachstum nur im Bestand möglich sein. (Geschäftsfeld Stadtraum und Natur 2019))

Um für die Zukunft von Uster ein optimales System zu entwickeln, müssen die Bedürfnisse der Bevölkerung berücksichtigt werden. So hat die Aufwertung des Stadtzentrums für die Bevölkerung von Uster oberste Priorität. Jedoch soll insbesondere die Poststelle mit dem Auto, trotz Zentrumsaufwertung, erreichbar bleiben. Zusätzlich wünscht sich die Bevölkerung, dass die nördlich des Bahnhofs gelegenen Quartiere besser an das Zentrum angebunden und die Gewerbeflächen in diesen Quartieren erweitert werden. Dies setzt voraus, dass die Gleisquerung verbessert und die Verbindungen der Stadtteile optimiert werden. Des Weiteren hat eine Bevölkerungsbefragung im Jahr 2015 ergeben, dass sich die Stadtbewohner eine zukunftsorientierte Veloinfrastruktur mit besonderem Augenmerk auf die Optimierung der Situation an den Bahnübergängen wünscht, insbesondere unter Berücksichtigung der neuen Velotypen wie Lastenräder und schnellen E-Bikes.

Um diese Bedürfnisse befriedigen zu können, wurden im Stadtentwicklungskonzept, kurz STEK, die Ziele und strategischen Stossrichtungen der räumlichen Stadtentwicklung von Uster bis 2035 festgelegt. Der Stadtrat von Uster legte fest, dass auf Grundlage des STEK die kommunalen Richt- und Nutzungspläne bis 2025 revidiert werden. Folglich ist anzunehmen, dass, um eine Prognose für die Zukunft von Uster machen zu können, die Leitziele des STEK berücksichtigt werden müssen. Die Leitziele lauten gemäss (Geschäftsfeld Stadtraum und Natur 2019) wie folgt:

Stadtidentität Bewahrung und Weiterentwicklung der Vielseitigkeit Die Stadt soll ihre polyzentrale Struktur behalten und die Vielseitigkeit der Innenstadt soll bewahrt werden. Uster soll in seiner Rolle als Regionalzentrum gestärkt werden, in dem das Wachstum auf das Zentrum und die gut erschlossenen Gebiete von Nänikon beschränkt wird.

Stadtentwicklung *Wohnen und Arbeiten finden statt* Das Arbeitsplatzangebot soll sich im Gleichschritt mit dem Wohnungsmarkt entwickeln, um das Verhältnis von zwei Einwohnern auf einen Arbeitsplatz beizubehalten. Im Rahmen der Stadtentwicklung 2035, möchte die Stadt Uster, die zentrumsnahen Gebiete und die Bahnhofsumgebung in ein, mit Wohnungen durchmisches Arbeitsplatzgebiet umgestalten.

Landschaft und Erholung *Grün- und Freiräume vor der Haustüre* Die Uster umgebenden Landschaften sollen erhalten und wo nötig aufgewertet werden und durch attraktive gestaltete Freiräume im Siedlungsgebiet, sowie durch gezieltes Aufwerten der Erholungsräume, den Nutzungsdruck auf die Naturräume gemildert werden.

Mobilität *Uster steigt um!* Um die Kapazitätsengpässe im bestehenden Verkehrsnetz zu mildern, erwägt Uster einen Umstieg vom motorisierten Individualverkehr, kurz MIV, auf den öffentlichen Verkehr, kurz ÖV, und auf den Langsamverkehr, sprich Velo- und Fussgängerverkehr. Die Stadt Uster setzt sich zum Ziel, eine Reduktion des MIV Anteil am Modalsplit des innerstädtischen Verkehrs zu erreichen und den Langsam-sprich Veloverkehr nachhaltig zu fördern. Dies geschieht durch die Verbesserung der Routen und Fahrbedingungen des Veloverkehrs. Insbesondere im Zentrum wird die Verkehrsführung angepasst, um einerseits die Erreichbarkeit mit dem Velo zu verbessern und andererseits die Aufenthaltsqualität durch die lokale Verkehrsberuhigung zu erhöhen.

Im Rahmen des Leitbild *Stadtraum Uster 2035* werden im STEK sogenannte Schlüsselprojekte definiert. Als Schlüsselprojekte werden Interventionen bezeichnet, die durch ihre Ausführung in ihrer Umgebung eine weitere Entwicklung auslösen sollen. Die wichtigsten Schlüsselprojekte sind: das Bahnhofsgebiet, das verkehrsberuhigte Zentrum, das Zeughausareal, die Erholungsachse Aabach, die urbane Strassenraumgestaltung im Zentrumsgebiet und die Fuss- und Velounterführung Brunnen-/Bahnhofstrasse, sowie die beiden kantonalen Projekte zur Stadterschliessung (Usterwest und Umfahrung Moosackerstrasse). Das Ausmass, der aufgrund der Ausführung dieser Projekte entstehenden Auswirkungen auf die Verkehrsleistung in Uster kann nicht mit absoluter Sicherheit vorhergesagt werden. (Geschäftsfeld Stadtraum und Natur 2019)

Die Stadtentwicklung sieht vor, dass das Zentrum von Uster attraktiver gestaltet werde soll, um dadurch die Nachfrage vor Ort zu steigern. Durch die Aufwertung des Strassenraumes und durch die Massnahmen zur Verkehrsberuhigung wird das Zentrum für den Langsam-verkehr besser erreichbar, wobei die Erreichbarkeit mit dem Auto gewahrt bleiben soll. Die Umgestaltung der Strassenräume der Innenstadt zu urbanen Begegnungszonen erfordert eine Anpassung der Verkehrsregime.

Aufgrund dessen, dass die Versorgungslage im Stadtzentrum die Standortqualitäten von Uster als Wohn- und Arbeitsstadt beeinflusst, hat diese Aufwertung höchste Priorität. Gemäss des STEK haben die bahnhofsnahen Grundstücke, insbesondere die Quartiere nördlich des Bahnhofs, das grösste Wachstumspotential. Die Umnutzung dieser Grundstücke infolge Aufwertung des Stadtzentrums wird mit grösster Wahrscheinlichkeit zu einer Erhöhung der Verkehrsbelastung am Bahnhof und den zentrumsnahen Verkehrsnetzen führen. Insbesondere auf dem Velonetz ist infolge dieser Entwicklung, mit einer zukünftig erhöhten Belastung zu rechnen. (Geschäftsfeld Stadtraum und Natur 2019)

4 Fallstudie

Verkehr ist in Uster ein politisch äusserst umstrittenes Thema. Das Zentrum ist stark geprägt durch den MIV und ein nahezu flächendeckendes Tempo 30 Regime. Der Quell- und Zielverkehr in Zentrum und der hauptsächlich in Nord-Süd Richtung erfolgende Durchgangsverkehr, haben ein hohes Verkehrsaufkommen im Zentrum zur Folge. Die Aufenthaltsqualität auf den Hauptrouten des Zentrums, wie zum Beispiel die Bankstrasse oder die Bahnhofstrasse, ist durch die hohe Verkehrsbelastung reduziert. Insbesondere die Bankstrasse ist zu Spitzenbelastungszeiten ein Nadelöhr im ÖV-Netz, da das grosse Verkehrsaufkommen das An- und Abfahren der Busse erschwert. Zusätzlich erreichen alle Buslinien, um möglichst kurze Wartzeiten zu ermöglichen, den Bahnhof zur selben Zeit. Dies hat eine hohe Belastung der bahnhofsnahen Verkehrsinfrastruktur zur Folge.

Die Kombination aus S-Bahn und sechs Stadtbuslinien erschliesst Uster durch den öffentlichen Verkehr in grossen Teilen. Jedoch ist die Fahrplanstabilität der Busse durch den Stau infolge des grossen Anteil des MIV am innerstädtischen Verkehr beeinträchtigt. (Geschäftsfeld Stadtraum und Natur 2019)

Der MIV-Anteil am innerstädtischen Ziel-, Quell- und Binnenverkehr beträgt gemäss STEK 57%. Demnach sind die Verkehrsprobleme von Uster mehrheitlich selbst verursacht. Zusätzlich hat das sternförmig angelegte Strassennetz zur Folge, dass der Nord-Süd Durchgangsverkehr durch das Stadtzentrum geführt wird. Die wichtigsten Knotenpunkte, wie zum Beispiel der Nüsslikreisel, der Nashornkreisel sowie die Seefeldstrasse, geraten in den Spitzenbelastungszeiten an ihre Kapazitätsgrenzen.

Die Situation wird sich Zukunft durch die Zunahme des Verkehrsaufkommens aufgrund des Bevölkerungs- und Arbeitsplatzwachstums, noch weiter verschärft.

Um eine ausreichende Mobilität gewährleisten zu können sowie die Umweltbelastung in der Stadt zu reduzieren, hat Uster im Rahmen des Gesamtverkehrskonzeptes des Kantons Zürich, zwei Ziele formuliert. Zum einen soll die Erreichbarkeit der urbanen Räume verbessert und zum anderen durch gezielte Eingriffe eine Erhöhung des Langsamverkehrsanteil am Gesamtverkehrsaufkommen erwirkt werden. Jedoch sollen die Kapazitäten des MIV weder erhöht, noch merklich reduziert werden. Das Langsamverkehrsnetz, sprich Velo- und Fusswegenetz, ist gemäss STEK, vor allem auf den kurzen und zentrumsnahen Hauptrouten zu stärken. Gemäss kantonalem Richtplan soll der Anteil des Langsamverkehrs am Gesamtverkehrsaufkommen, von 20% (2011) auf 22% (2030) erhöht werden.

Die Abbildung 4.1 zeigt die geplanten kantonalen Strassenprojekte Usterwest und Moosackerstrasse. Durch diese Strassenprojekte, sollen einerseits die Stadterschliessung verbessert und andererseits das Zentrum vom Durchgangsverkehr entlastet werden. Insbesondere die Verkehrsbelastung des Nüsslikreisel soll durch den Bau der Moosackerstrasse reduziert werden. Gemäss STEK ist die Realisierung der Uster Westumfahrung in näherer Zukunft nicht absehbar. Mit dem Bau der Moosackerstrasse kann hingegen in näherer Zukunft gerechnet werden, was zu einer Reduktion des Durchgangsverkehrs im Zentrum und zu einer Entlastung des Nüsslikreisel führen wird. Laut STEK wird die Situation an den bestehenden Bahnübergängen, durch den Bau der Moosackerstrasse nicht verbessert. Um die Situation an den Bahnübergängen nachhaltig zu verbessern, muss ein anderer Lösungsansatz gefunden werden.

Die Abbildung 4.2 zeigt das Velonetz der Innenstadt von Uster. In grün sind die Hauptverbindungen, in blau die Nebenverbindungen und in violett die Veloschnellroute dargestellt.

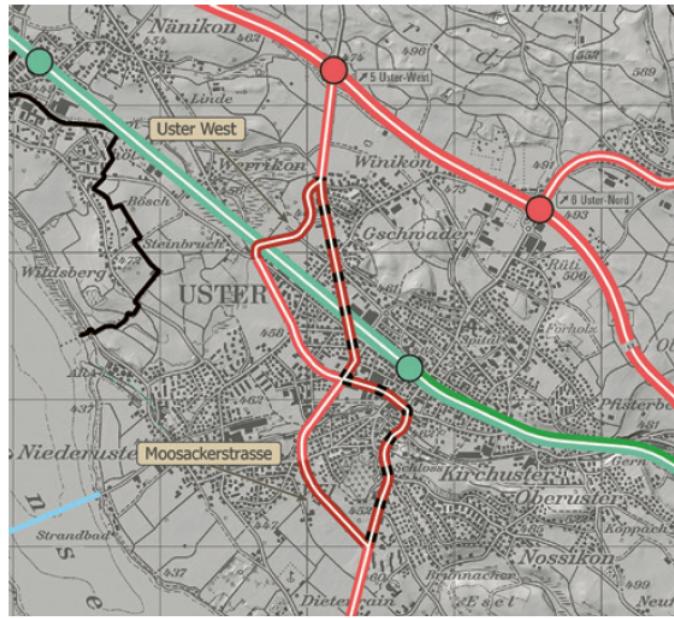


Abbildung 4.1: Strassenprojekte Moosackerstrasse und Usterwest (Geschäftsfeld Stadt-
raum und Natur 2019)

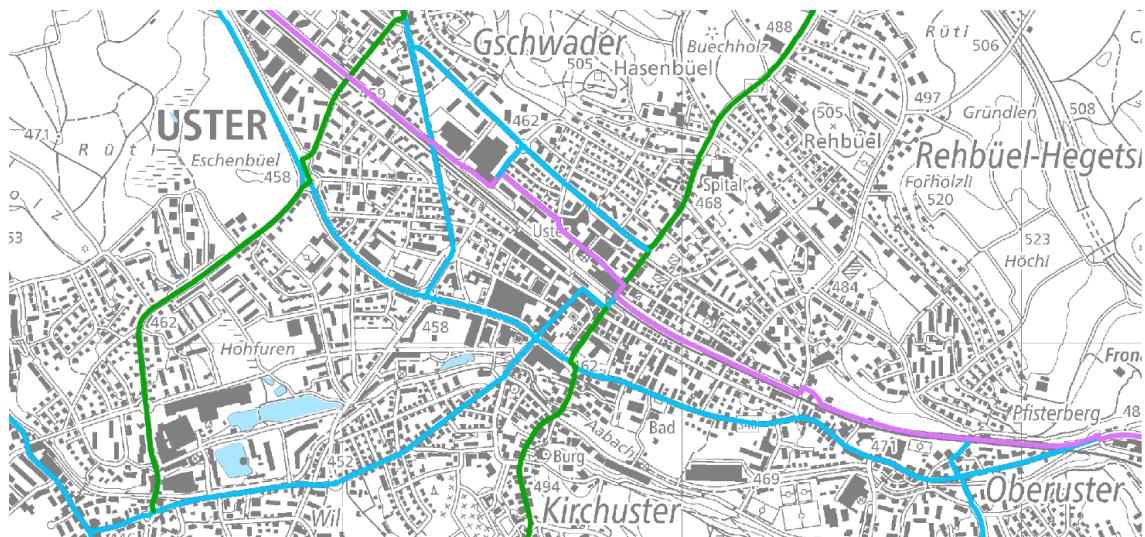


Abbildung 4.2: Velonetz Alltag (Kanton Zürich 2019a)

Wie in der Abbildung ersichtlich, ist der Bahnübergang Brunnenstrasse der zentrale Knotenpunkt des Velonetz. Die Gleisquerung ist für den Langsamverkehr aufgrund des dichten S-Bahn Fahrplans nur mit langen Wartezeiten möglich.

Gemäss der Leitziele, die sich Uster im Rahmen der Stadtentwicklung 2035 gegeben hat, soll Uster zur Velostadt ausgebaut werden. Die von der SP eingereichte Velointiative wiederspiegelt zusätzlich das Bedürfnis der Bevölkerung nach einer Förderung des Langsamverkehrs. Insbesondere die im kantonalen Städtevergleich als unterdurchschnittlich erachtete Dichte

4 Fallstudie

des Velonetz stellt für die Bevölkerung ein Mangel dar. Zudem ist die Verkehrssicherheit aufgrund der stark am MIV ausgerichteten Strassenräume auf dem bestehenden Velonetz ungenügend.

Fokus Nach der Analyse des STEK bin ich zum Schluss gekommen, dass die Zerschneidung der Stadt durch die Gleisanlage eines der grössten Probleme von Uster darstellt. Die Verbesserung der Gleisquerung und Erhöhung der Sicherheit auf dem bestehenden Velonetz und der damit einhergehenden Erhöhung der Erreichbarkeit des Zentrums, erachte ich als optimalen Ansatz, um eine Verbesserung der Verkehrssituation in Uster zu erreichen.

Unter Anbetracht der ersten Bestrebungen der Stadt Uster, den Verkehr im Zentrum zu reduzieren, sprich die Umleitung des Nord-Süd Durchgangsverkehr über die Oberlandstrasse zur Unterführung Dammstrasse, und der Leitziele des STEK "den Langsamverkehr zu fördern", habe ich mich dazu entschieden, die Situation am Bahnübergang Brunnenstrasse zu optimieren.

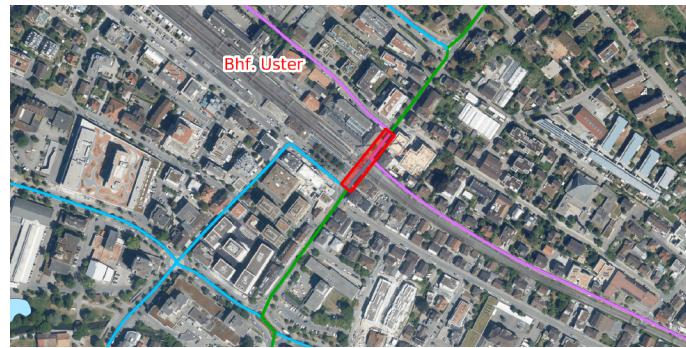


Abbildung 4.3: Bahnübergang Brunnenstrasse und Velonetz Alltag (Kanton Zürich 2019a)

Die Abbildung 4.3 zeigt den Bahnübergang Brunnenstrasse, welcher die südlich des Bahnhofs gelegenen Stadtteile mit dem Spital und der Sportanlage Buchholz, sowie die nördlich des Bahnhofs gelegenen Quartiere mit dem Stadtzentrum und dem Greifensee, verbindet.

Die im Rahmen dieser Projektarbeit generierten Optimierungsvorschläge sollen die Verkehrssituation nachhaltig verbessern. Deshalb untersuche ich den Effekt dieser Varianten auf die Verkehrssituation über einen Zeitraum von vierzig Jahren. Um das beste Investment für die Stadt Uster ermitteln zu können, definiere ich im nachfolgenden Abschnitt die Ziele die mit der Intervention erreicht werden sollen.

4.1 Formulierung der Ziele und Rahmenbedingungen

In Anbetracht der dezentralen Struktur von Uster und der geplanten Aufwertung der Innenstadt ist eine Verbesserung der Erreichbarkeit des Zentrums unabdingbar. Eine Verbesserung der Erreichbarkeit setzt voraus, dass die Reisezeit verkürzt und die Verkehrssicherheit erhöht wird. Durch die Umgestaltung des Bahnübergangs und der Verbesserung der Signalisation soll der Teilung der Stadt durch die Gleisanlagen entgegengewirkt und so ein wichtiger Beitrag zur Stadtentwicklung geleistet werden. Dies soll eine Verkehrsberuhigung der zentrumsnahen Verkehrsnetze fördern und durch die punktuelle Aufwertung die Aufenthaltsqualität steigern.

Die geplante Intervention in das bestehende Infrastrukturnetz soll die Verkehrslage am Bahnhof nachhaltig optimieren sowie die Attraktivität und die Standortqualitäten von Uster stärken. Das Ziel ist, unter Berücksichtigung der unsicheren zukünftigen Gegebenheiten, der gesteigerten Nachfrage nach Mobilität Rechnung zu tragen sowie den Langsamverkehrsanteil am Modalsplit des Innenstadtverkehrs zu beeinflussen.

Diese Optimierung soll durch die Minimierung der Kosten den Gesamtnutzen aller Interessensgruppen steigern. Aufgrund dessen, dass in der nachfolgenden Berechnung, nur die Kosten der beteiligten Personen berücksichtigt werden, ist die Minimierung der Kosten mit der Maximierung des Nutzens gleichzusetzen.

So sollen einerseits durch die Verkürzung der Reisezeit die Kosten der Nutzer gesenkt und durch die Erhöhung der Verkehrssicherheit die Kosten der Öffentlichkeit reduziert werden. Andererseits soll für die Besitzer das optimale Investment ermittelt werden, um die Infrastruktur für die nächsten vierzig Jahre zu optimieren. Schlussendlich wird durch die Optimierung der Zielfunktion diejenige Variante bestimmt, die den Netto-Nutzen der Interessensgruppen über den betrachteten Zeitraum am meisten vergrössert.

4.1.1 Interessensgruppen

Der Nutzen einer Intervention, ist als die positive oder negative Auswirkung einer Intervention auf die beteiligten Personen definiert. Um den Mehrwert einer Intervention ermitteln zu können, müssen in einem ersten Schritt die beteiligten Personen bestimmt werden. Die sogenannten Interessensgruppen werden gemäss Abschnitt 2.2 bestimmt und im nachfolgenden Abschnitt kurz erläutert. Die wichtigsten Kosten der beteiligten Parteien werden vorgestellt.

Besitzer Die Interessensgruppe der Besitzer setzt sich aus verschiedene Parteien zusammen. Die wichtigsten involvierten Parteien sind die Stadt Uster und der Kanton Zürich als Eigentümer der Strasseninfrastruktur und die SBB als Besitzerin der Bahninfrastruktur. Außerdem sind sie die wichtigsten Akteure im politischen Diskurs über die Notwendigkeit einer Veränderung der Infrastruktur und haben dementsprechend einen grossen Einfluss auf den Entscheid, welche Variante gebaut werden soll.

Der Besitzer der Infrastruktur bezahlt einerseits den Bau der Infrastrukturintervention und ist andererseits dafür verantwortlich, dass die Serviceleistung der Infrastruktur über den

4 Fallstudie

betrachteten Zeithorizont auf einem angemessenen Niveau gewährleistet ist. Das bedeutet, dass er für die Kosten der Wartung und Instandhaltung der Infrastruktur aufkommen muss. Die Kosten, die dem Besitzer über den betrachteten Zeitraum entstehen, setzten sich aus den Arbeits- und Materialstunden für die jährliche Wartung und den Kosten für den Bau einer Variante zusammen.

Nutzer Die Nutzer der Infrastruktur sind zum einen die Velofahrer, wobei der Velofahrer im Rahmen dieser Untersuchung sämtliche Verkehrsteilnehmer des Langsamverkehrs repräsentiert und zum anderen der MIV. Langsamverkehr bedeutet in diesem Fall, dass der Antrieb ausschliesslich durch Muskelkraft erfolgt. Davon ausgenommen sind E-Bikes mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von maximal 35 km/h.

Das Befahren einer Infrastruktur kann dem Nutzer Kosten verursachen. In Anbetracht der momentanen Verkehrssituation am Bahnübergang sind die massgebenden Kosten, die dem Nutzer entstehen, zum einen die Kosten durch verlängerte Reisezeiten, die sogenannten Reisezeitkosten (*TT*) (engl. Travel Time Cost) und die Kosten die durch den Betrieb des Fahrzeugs beim Befahren der Infrastruktur entstehen.

Der Nutzer hat das grösste Interesse an einer Veränderung der aktuellen Verkehrssituation und ist am stärksten von einer Veränderung betroffen. Demnach ist es unerlässlich, die Kosten, die dem Nutzer entstehen, in der Berechnung der Kosten einer Intervention zu berücksichtigen.

Öffentlichkeit Die Öffentlichkeit setzt sich aus den direkt oder indirekt von der Infrastruktur betroffenen Personen zusammen. Die direkt Betroffenen sind zum einen die Anwohner am Bahnübergang und zum anderen die Inhaber von Geschäften und Restaurants in unmittelbarer Umgebung der Infrastruktur. Sie werden durch die Schadstoffemissionen und die Lärmemission, die von der Infrastruktur verursacht werden, beeinträchtigt und tragen die Kosten, die durch diese Belastung entstehen.

Die indirekt betroffene Öffentlichkeit stellt im Rahmen dieser Untersuchung die gesamte Bevölkerung der Stadt Uster dar. Diese wird durch die Nutzung der Infrastruktur indirekt beeinträchtigt und trägt einerseits die Kosten durch die Belastung der Umwelt mit und zusätzlich die entstehenden Gesundheitskosten durch Unfälle auf der Infrastruktur.

Zur Vereinfachung werden die direkt und indirekt betroffenen Personen unter der Bezeichnung *Öffentlichkeit* zusammengefasst.

4.1.2 Zielfunktion

Bei der Optimierung eines Systems sind mathematische Modelle sehr hilfreich. Ein besonders nützliches Modell in der Analyse von Varianten ist ein Lineares Programm. Dies setzt voraus, dass alle relevanten Informationen aus der Situationsanalyse und der Zielformulierung in ein mathematisches Modell umgewandelt werden und das Problem mithilfe der Zielfunktion mathematisch formuliert wird. Im Rahmen dieser Arbeit, erfolgt dies durch die nachfolgend beschriebene Zielfunktion 4.1, welche alle relevanten Kosten der Interessensgruppen der Infrastruktur beinhaltet. (Adey et al. 2019)

Die totalen Kosten K einer Interventionsstrategie sind definiert als die Kosten aller Interessensgruppen über den untersuchten Zeitraum von vierzig Jahren $[0, T]$.

Da keine Erlöse in Betracht gezogen werden, ist die Minimierung der Gesamtkosten äquivalent zur Maximierung des Netto-Nutzens aller Beteiligten. Die Bedingungen 4.2 voraus, dass keine negativen Werte berücksichtigt werden.

$$\text{Min. } K = \text{Min. } [K_W + K_B + K_{TT} + K_E + K_A] \quad (4.1)$$

$$K_W \geq 0, K_B \geq 0, K_{TT} \geq 0, K_E \geq 0, K_A \geq 0 \quad (4.2)$$

wobei:

K = Totale Kosten über den betrachteten Zeitraum von T Jahren

K_W = Totale Bau- und Wartungskosten

K_B = Totale Betriebskosten

K_{TT} = Totale Reisezeitkosten

K_E = Totale Umweltbelastungskosten

K_A = Totale Unfallkosten

Interessensgruppe	Kostentyp	Symbol	Einflussfaktoren
Besitzer	Wartungskosten (W)	K_W	Arbeits- und Materialkosten
Nutzer	Betriebskosten (B)	K_B	Kraftstoff- und Reparaturkosten
	Reisezeitkosten (TT)	K_{TT}	Kosten einer Arbeitsstunde
Öffentlichkeit	Umweltbelastungskosten (Environment) (E)	K_E	Fahrzeugtechnologie
	Unfallkosten (A)	K_A	Verkehrssicherheit

Tabelle 4.1: Tabelle der Interessensgruppen und Kostenstrukturen

Zur Übersicht fasst die Tabelle 4.1 die Interessensgruppen, sowie die jeweiligen Kosten zusammen. Diese Kosten werden im nachfolgenden Kapitel erläutert.

4.2 Kostenstruktur

Um das Risiko das von der Durchführung einer Intervention ausgeht, berechnen zu können, muss die verwendete Kostenstruktur definiert werden. Im allgemeinen erfolgt die Approximation der Kosten durch die Bestimmung der relevanten Faktoren, wie zum Beispiel der Länge und der Breite der Infrastruktur, des täglichen Verkehrsaufkommens, der benötigten Reisezeiten sowie weiterer Faktoren. Die Ermittlung der Kosten erfolgt im Anschluss durch die Multiplikation dieser Faktoren mit den dazugehörigen Einheitskosten. (Adey u. a. 2012)

Wartungskosten

Die Berechnung der Wartungskosten K_W der Infrastruktur erfolgt gemäss der Formel 4.3. Sie setzen sich zusammen aus den einmaligen Investitionskosten für den Bau der Infrastruktur K_{Bau} und den jährlich anfallenden Wartungskosten $K_{Wartung,t}$.

$$K_W = K_{Bau} + \sum_{t=0}^T K_{Wartung,t} \quad (4.3)$$

wobei:

K_W = Totale Wartungskosten für T Jahre

K_{Bau} = Baukosten der Variante

$K_{Wartung,t}$ = Wartungskosten pro Jahr

Die Berechnung der jährlichen Wartungskosten erfolgt anhand Formel 4.4. Die angenommenen Einheitskosten für den Bau und die Instandhaltung sind anhand von Werten der Fachliteratur hergeleitet und werden nachfolgend erläutert.

$$K_{Wartung,t} = \sum_{k=1}^2 EK_{Wartung,k} \cdot s_k \cdot b_k \quad (4.4)$$

$$k = \begin{cases} 1 & \text{für Strasse} \\ 2 & \text{für Unterführung} \end{cases}$$

wobei:

$EK_{Wartung,k}$ = Einheitskosten pro $[m^2]$

s_k = Länge der Infrastruktur in $[m]$

b_k = Breite der Infrastruktur in $[m]$

k = Art der Infrastruktur

Die Erstellung zweier neuer Radstreifen à je 1.5 m Breite kostet pro Laufmeter 850 CHF. Die Investitionskosten pro Quadratmeter für den Bau einer Velounterführung unter dem Lastfall Eisenbahn, betragen 3750 CHF. Der Bau der Zufahrtsrampen zu den Velounterführungen kostet pro Rampe 130'000 CHF.

Die Wartungskosten welche für die Instandhaltung der Strassen, inklusive der Fahrradstreifen und der Fussgängerwege anfallen, betragen jährlich $5 \frac{\text{CHF}}{\text{m}^2}$. Die wartungsintensivere Infrastruktur der Unterführung wird jährlich mit $30 \frac{\text{CHF}}{\text{m}^2}$ instand gehalten. (Kontextplan AG 2010)

Diese Kosten sind hauptsächlich von der Auslastung der Infrastruktur und vom Gewicht der Fahrzeuge, die sie befahren, abhängig. Da diese Kosten im Vergleich zu den anderen Kostenpositionen deutlich geringen ausfallen, verzichte ich auf eine Variation dieser Parameter über den betrachteten Zeitraum. Die nachfolgende Tabelle 4.2 fasst die für die Besitzer anfallenden Einheitskosten zusammen.

		Fahrbahn	Veloweg	Unterführung
Wartungskosten	$\frac{\text{CHF}}{\text{m}^2 \text{ Jahr}}$	5	5	30
Baukosten	$\frac{\text{CHF}}{\text{m}}$	-	850	18'900

Tabelle 4.2: Bau- und Wartungskosten

Betriebskosten

Die Fahrzeugbetriebskosten K_B sind als die, jährlich für den Nutzer für die Instandsetzung und den Betrieb eines Fahrzeugs anfallenden Kosten definiert und somit die Kosten die bei der Nutzung der Infrastruktur entstehen können.

Die Kosten, die für den betrachteten Zeitraum von T Jahren anfallen, werden gemäss Formel 4.5 durch die Multiplikation der Anzahl Nutzer mit der zurückgelegten Distanz und mit den Einheitskosten pro Fahrzeugkilometer, berechnet.

$$K_B = \sum_{t=0}^T \left[\sum_{j=1}^2 EK_{B,j} \cdot s_j \cdot DTV_{j,t} \right] \cdot 365 \quad (4.5)$$

$$j = \begin{cases} 1 & \text{für } MIV \\ 2 & \text{für } Velo \end{cases}$$

wobei:

K_B = Totale Fahrzeugbetriebskosten

$EK_{B,j}$ = Einheitskosten pro [km]

s_j = Länge der Infrastruktur; nach Fahrzeugtyp in [km]

$DTV_{j,t}$ = Tägliches Verkehrsaufkommen nach Fahrzeugtyp im Jahr t

j = Art des Fahrzeugs

Die Einheitskosten des Fahrzeugbetriebs sind mehrheitlich abhängig von der Entwicklung der Fahrzeugtechnologie und der Verarbeitungsqualität. Die Einführung autonomer Fahrzeuge würde diese Kostenposition in Zukunft obsolet machen. Jedoch ist die Zulassung solcher Fahrzeuge für den innerstädtischen Verkehr nicht vor 2050 zu erwarten. Da dies, erst am Ende des betrachteten Zeithorizont eine Rolle spielen wird und der Effekt, den die Einführung autonomer Fahrzeuge auf die Betriebskosten des Nutzers hat, nicht eindeutig beziffert werden kann, verzichte ich auf eine Variation dieser Parameter und erachte die Einheitskosten des Fahrzeugbetriebs über den betrachteten Zeithorizont als konstant.

Die entstehenden Betriebskosten werden anhand der nachfolgenden Referenzwerte des Fahrzeugbetriebs ermittelt.

Für den MIV nehmen ich gemäss der Angaben des TCS an, dass die Einheitskosten EK_B für den Betrieb eines Fahrzeugs bei 0.7 CHF pro km liegen. Diese Kosten setzen sich aus den Kosten für den Kraftstoff, den Kosten für die Instandhaltung des Fahrzeugs und dem Wertverlust zusammen. Für die Velofahrer nehme ich, nach der Konsultation verschiedener Fachliteraturen sowie der Berechnung eigener Referenzwerte, dass sich die Kosten für den Betrieb auf 0.15 CHF pro km belaufen. (Quelle: TCS und eigene Erfahrungswerte)

Reisezeitkosten

Erleidet man beim Befahren einer Infrastruktur einen Zeitverlust, entsteht dem Nutzer ein Schaden. Zieht man in Betracht, dass der Nutzer in dieser Zeit hätte arbeiten können oder Freizeit verbringen, kann dieser Schaden monetär beziffert werden. Beispiele hierfür wären die Mehrkosten eines Spediteurs aufgrund des Zeitverlustes oder die Mehrkosten auf einem Ausflug durch eine verpasste Zugverbindung.

Diese Kosten werden indirekt vom Zustand des Fahrbahnbelages beeinflusst. Da die Reisegeschwindigkeit und somit die Zeit die benötigt wird, eine gewisse Strecke zurückzulegen, von diesem abhängig ist.

Die Berechnung der totalen Reisezeitkosten K_{TT} erfolgt gemäss Formel 4.6 in Anlehnung an die Berechnung der *Travel Time Cost* aus (Adey u. a. 2012, S.643).

$$K_{TT} = \sum_{t=0}^T \left[\sum_{j=1}^2 DTV_{j,t} \cdot t_j \cdot EK_{TT,j} \right] \cdot 365 \quad (4.6)$$

wobei:

K_{TT} = Totale Reisezeitkosten für T Jahre

$DTV_{j,t}$ = Tägliches Verkehrsaufkommen nach Fahrzeugtyp im Jahr t

t_j = Zeitverlust nach Fahrzeugtyp

$EK_{TT,j}$ = Einheitskosten der verlorenen Zeit in [CHF/h]

Die Zeit, die man benötigt eine bestimmte Strecke zurück zu legen, ist abhängig von der gefahrenen Geschwindigkeit v_j , welche wiederum durch den Zustand der Strasse sowie die Kapazität C_j der Infrastruktur bestimmt wird. Diese Approximation ermöglicht es, die verlorene Zeit gemäss 4.7 zu berechnen, wobei die Parameter α und β die Strasseneigenschaften repräsentieren.

$$t = \frac{s_k}{v_j} \left(1 + \alpha \left(\frac{DTV_{j,t}}{C_j} \right)^\beta \right) \quad (4.7)$$

wobei:

v_j = Gefahrene Geschwindigkeit nach Fahrzeugtyp

α = (0.15 vorgeschlagen nach (Adey u. a. 2012))

β = (4 vorgeschlagen nach (Adey u. a. 2012))

C_j = Kapazität der Infrastruktur pro Tag nach Fahrzeugtyp

Der Bahnübergang Brunnenstrasse ist aufgrund des regen S-Bahn-Verkehrs und somit dichten Fahrplans am Bahnhof Uster pro Stunde bis zu 40' geschlossen. Daraus resultiert gemäss STEK pro Nutzer des Bahnübergangs eine durchschnittliche Wartezeit von bis zu 5

4 Fallstudie

Minuten, was einem Zeitverlust von $0.0833 \text{ h}/\text{Fahrzeug}$ entspricht. Um die durchschnittliche Wartezeit in die Berechnung der Reisezeitkosten miteinzubeziehen, wird der beim Befahren der Infrastruktur entstehende Zeitverlust t_j um diesen Faktor vergrössert.

Der beim Benutzen des Bahnübergangs anfallende Zeitverlust nach Formel 4.7 ist somit hauptsächlich von der Schliesszeit der Bahnschranken abhängig.

Die durchschnittliche Wartezeit pro Nutzer setzt sich aus der Zeit, die ein Zug für die Durchfahrt benötigt, und einem Faktor, der die Zeit für die Öffnung der Schranken sowie die Wartezeit aufgrund eines allfällige entstehenden Rückstaus repräsentiert, zusammen. Die durchschnittliche Durchfahrtszeit eines Zuges beträgt gemäss STEK 3' und der vorgängig erläuterte Faktor wird für die Berechnung, nach Konsultation verschiedener Literaturen mit 2' angesetzt.

Die Einheitskosten des Zeitverlustes $EK_{TT,j}$ pro Velofahrer betragen 19.70 CHF/h . Um den durchschnittlichen Auslastungsgrad von 1.6 Personen pro Auto zu berücksichtigen, wird dieser Betrag mit dem Faktor 1.6 multipliziert. Somit betragen die Einheitskosten des Zeitverlustes für den motorisierten Individualverkehr 31.52 CHF/h pro Auto.
 (Adey u. a. 2012) (Bundesamt für Statistik (BFS) 2017)

Die nachfolgenden Tabelle 4.3 fasst die für die Nutzer anfallenden Einheitskosten zusammen.

	Betriebskosten $\frac{\text{CHF}}{Pkm}$	Reisezeitkosten $\frac{\text{CHF}}{h}$
Velo	0.15	19.70
MIV	0.7	31.52

Tabelle 4.3: Übersicht der Nutzerkosten

Umweltkosten

Die gemäss Formel 4.8 berechneten Kosten der Belastung der Umwelt K_E (*Englisch: Environment*), bestehen aus den Kosten durch die Schadstoffbelastung K_S und der Kosten durch die Lärmbelastung K_L , die durch den MIV verursacht werden.

$$K_E = \sum_{t=0}^T (K_{L,t} + K_{S,t}) \quad (4.8)$$

wobei:

K_E = Totale Umweltkosten

$K_{L,t}$ = Kosten durch die Lärmbelastung pro Jahr

$K_{S,t}$ = Kosten durch die Schadstoffbelastung pro Jahr

Die **Lärmbelastung** durch den Verkehr verursacht Kosten K_L die gemäss Formel 4.9 berechnet werden. Eine solche Lärmbelastung kann einerseits zu Mietzinsausfällen führen, da eine erhöhte Lärmbelastung zu einer Reduktion des Mietzinses führen kann, und andererseits zu Kosten infolge der Schädigung der Gesundheit der Anwohner. Eine solche Beeinträchtigung der Gesundheit kann in Form von Kopfschmerzen, Bluthochdruck, Schlafstörungen sowie psychischer Belastung auftreten. (Ecoplan, VSS 2007)

$$K_{L,t} = EK_L \cdot DTV_{MIV,t} \cdot s_i \cdot 365 \quad (4.9)$$

wobei:

EK_L = Einheitskosten der Lärmbelastung pro Fahrzeugkilometer

$DTV_{MIV,t}$ = Tägliches Verkehrsaufkommen des MIV im Jahr t

s_{MIV} = Zurückgelegte Distanz in [km] pro Motorfahrzeug

Der Lärm entsteht mehrheitlich durch die Motorengeräusche sowie durch die Abrollgeräusche der Reifen. Eine Schwierigkeit bei der Bezifferung des Ausmaßes dieser Kosten liegt darin, die erwähnten Auswirkungen des Lärms auf die Öffentlichkeit zu quantifizieren. (Adey u. a. 2012)

Das Ausmass des entstandenen Schadens ist somit vollständig von der Fahrzeugtechnologie abhängig. Eine Reduktion der Lärmbelastung durch Veränderung der Reifentechnologie ist im betrachten Zeitraum nicht zu erwarten. Die Einheitskosten der Lärmbelastung EK_L werden anhand des Berichts zu den externen Lärmkosten des Strassenverkehrs, mit 0.0149 CHF/Fahrzeugkilometer angenähert. (Bundesamt für Raumentwicklung 2004)

4 Fallstudie

Die in Formel 4.10 dargestellten Kosten der **Schadstoffbelastung** K_S , sind die Kosten, die der Öffentlichkeit infolge der Emissionen von Motorfahrzeugen entstehen. Diese Schäden können neben gesundheitlichen Problemen für die Anwohner und Nutzer der Strasse und der Beeinträchtigung des Pflanzenwachstums entlang der Infrastruktur auch die Reduktion des Werts einer Liegenschaft sein.

$$K_{S,t} = EK_S \cdot DTV_{MIV,t} \cdot s_{MIV} \cdot \left(1 - \Phi_{E-Auto,t}\right) \cdot 365 \quad (4.10)$$

wobei:

EK_S = Einheitskosten der Schadstoffbelastung pro Fahrzeugkilometer

$DTV_{MIV,t}$ = Tägliches Verkehrsaufkommen des MIV im Jahr t

s_{MIV} = Zurückgelegte Distanz in [km] pro Motorfahrzeug

$\Phi_{E-Auto,t}$ = Marktanteil E-Autos am $DTV_{MIV,t}$ im Jahr t

Die entstehenden Kosten der Schadstoffbelastung werden mehrheitlich durch die gefahrene Geschwindigkeit und den Verkehrsfluss beeinflusst. So nimmt die Belastung der Luft durch Schadstoffe deutlich zu, wenn vermehrt im *Stopp and Go*-Verkehr gefahren wird. Da für das Modellieren dieser Beziehung im Rahmen meiner Untersuchungen nicht genügend Zeit zur Verfügung stand, bestimme ich die Kosten der Schadstoffbelastung anhand des Schlussberichts zu den externen Kosten im Straßenverkehr. Somit betragen die für die Öffentlichkeit anfallenden Einheitskosten EK_S 0.0345 CHF/Fahrzeugkilometer.

(Ecoplan, VSS 2007)

Da elektronisch angetriebene Fahrzeuge keine Emissionen verursachen und demzufolge keine Kosten infolge Schadstoffbelastung entstehen, wird der Anteil an E-Autos beim Berechnen der Umweltkosten vom DTV abgezogen.

	Umweltkosten $\frac{CHF}{Pkm}$
Lärmbelastung	0.0149
Schadstoffbelastung	0.0345

Tabelle 4.4: Übersicht der Umweltkosten

Marktanteil E-Autos

Im Jahr 2019 betrug der Marktanteil der E-Autos am Personenwagenbestand in der Schweiz 0.621 %. Für das Jahr 2050 nehmen ich an, nach Konsultation verschiedenster Literaturen, dass der Marktanteil der E-Autos in der Schweiz bei 90 % zu liegen kommt.

(BFS und ASTRA 2019) Um die Berechnung zu vereinfachen nehme ich an, dass das Wachstum linear erfolgt. Somit beträgt der jährliche Anstieg des Marktanteils der E-Autos am Personenwagenbestand 2.88 %. Die Resultate meiner Berechnungen des jährlichen Marktanteils der E-Autos am Strassenfahrzeugbestand Φ_{E-Auto} ist in der nachfolgenden Abbildung 4.4 festgehalten.

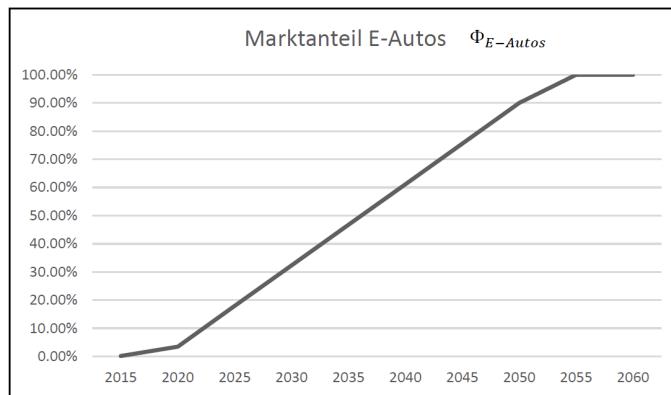


Abbildung 4.4: Marktanteil der E-Autos am Strassenfahrzeugbestand

Unfallkosten

Die totalen Unfallkosten K_A , welche von der Öffentlichkeit für den betrachteten Zeitraum getragen werden müssen, werden gemäss Formel 4.11 berechnet. So ergibt sich aus der Multiplikation der Anzahl Fahrzeuge und der Unfallwahrscheinlichkeit, die Anzahl Unfälle auf der Infrastruktur. Die Anzahl Unfälle multipliziert man, um die gesamten Unfallkosten zu ermittelt, mit den Einheitskosten der jeweiligen Unfalltypen.

In Betracht gezogen werden drei verschiedene Unfalltypen $[a,b,c]$. Unfälle mit entstandenen Sachschäden und leichtverletzten Personen werden in die Kategorie a eingeteilt. Für Unfälle mit schwerverletzten Beteiligten wird die Kategorie b definiert und für Unfälle mit Todesfolge die Kategorie c . Die Kategorien unterscheiden sich in der Unfallhäufigkeit nach Fahrzeugart $\gamma_{j,n}$, sowie der entstehenden Einheitskosten pro Unfall $EK_{j,n}$.

$$K_A = \sum_{t=0}^T \left[\sum_{j=1}^2 \left(\sum_{n=a}^c EK_{j,n} \cdot \gamma_{j,n} \right) \cdot DTV_j \cdot s_j \cdot 365 \right] \quad (4.11)$$

$$n = \begin{cases} a & \text{für } \textit{Sachschäden und Leichtverletzte} \\ b & \text{für } \textit{Schwerverletzte} \\ c & \text{für } \textit{Todesfall} \end{cases}$$

wobei:

K_A = Totale Unfallkosten

$EK_{j,n}$ = Einheitskosten pro Unfall nach Fahrzeugtyp

$DTV_{j,t}$ = Tägliches Verkehrsaufkommen nach Fahrzeugtyp im Jahr t

$\gamma_{j,n}$ = Unfallwahrscheinlichkeit nach Fahrzeugtyp

n = Unfallart

Wichtig anzumerken ist, dass die ermittelten Unfallrisiken die Anzahl Unfälle eines Unfalltyps pro Personenkilometer darstellen. Das bedeutet, dass für die Berechnung der Personenkilometer des MIV, der durchschnittliche Auslastungsgrad in Betracht gezogen werden muss. Somit wird in der Berechnung der Unfallkosten der DTV_{MIV} mit einem Faktor 1.6 multipliziert. (Bundesamt für Statistik (BFS) 2017)

Die Gefahrenlage auf der Infrastruktur wird durch die Berechnung der Unfallrisiken anhand der gesamtschweizerischen Unfalldaten, abgeschätzt. Die effektive Gefahrensituation wird dadurch jedoch nicht berücksichtigt. Um diese berücksichtigen zu können, müssten die Unfalldaten der Brunnenstrasse verwendet werden. Diese sind jedoch unvollständig und daher verwende ich zur Berechnung der Unfallrisiken die Unfalldaten für die ganze Schweiz.

Da die Entwicklung der Verkehrssicherheit von verschiedenen Faktoren abhängig ist, habe ich mich im Rahmen dieser Untersuchungen aus Zeitgründen dazu entschieden, die

Entwicklung der Unfallrisiken über den betrachteten Zeithorizont nicht zu variieren. Eine Untersuchung des Effekts der Veränderung der Unfallrisiken in Abhängigkeit der gebauten Variante erfolgt im Abschnitt 4.5.2.

Unfallrisiko

Die Wahrscheinlichkeit, im Strassenverkehr einen Unfall zu erleiden, ist von verschiedenen Faktoren abhängig. In dem ich die Anzahl Unfälle nach Unfallart durch die totale Anzahl gefahrener Personenkilometer nach Fahrzeugart teile, erhalte ich das Risiko eines Unfalls pro gefahrenem Personenkilometer $\gamma_{j,n}$.

Unter dem Stichpunkt MIV zusammengefasst sind die Personenwagen und Motorräder sowie Motorfahrräder und schnelle E-Bikes. Die Gesamtleistung der Personenwagen in der Schweiz, lag im Jahr 2018 bei 96.9 Mrd. Personenkilometer. Die Verkehrsleistung der Motorräder, inklusive Motorfahrräder und schnelle E-Bikes lag bei 2.2 Mrd. Personenkilometer. Daraus ergibt sich eine Verkehrsleistung des MIV von 99.1 Mrd. Personenkilometer für das Jahr 2018.

Im Jahr 2018 erlagen insgesamt 116 Personen den Folgen eines Unfalls mit Beteiligung des MIV, 1898 Personen wurden schwer- und 12'106 Personen leicht verletzt.

(Bundesamt für Statistik (BFS) 2019) (Bundesamt für Strassen ASTRA 2020)

Das Unfallrisiko des Langsamverkehrs, den ich unter dem Begriff *Velo* zusammenfasse, berechne ich nach demselben Vorgehen. Die Verkehrsleistung der Velofahrer und langsamen E-Bikes lag im Jahr 2018 bei 2'520 Mio. Personenkilometer.

Im Jahr 2018 verunfallten in Zusammenhang mit dem Langsamverkehr 26 Personen tödlich.

Im selben Zeitraum wurden 878 Personen schwer- und 2815 Personen leicht verletzt.

(Bundesamt für Statistik (BFS) 2019) (Bundesamt für Strassen ASTRA 2020)

Die berechneten Risiken sind in Tabelle 4.5 für die verschiedenen Fahrzeuge j und Unfalltypen n zusammengefasst.

Fahrzeugtyp	Unfalltyp a	Unfalltyp b	Unfalltyp c
MIV	$1.222 \cdot 10^{-7}$	$1.915 \cdot 10^{-8}$	$1.171 \cdot 10^{-9}$
Velo	$1.117 \cdot 10^{-6}$	$3.484 \cdot 10^{-7}$	$1.032 \cdot 10^{-8}$

Tabelle 4.5: Tabelle der Unfallrisiken $\gamma_{j,n} \left[\frac{\text{Unfälle}_{j,n}}{\text{Pkm}_j} \right]$

Nach der ausführlichen Betrachtung verschiedenster Literaturen zum Thema: *Kosten die durch Strassenverkehrsunfälle entstehen* und einem Gespräch mit Herr Dr. Martani, habe ich für die Berechnung der Unfallkosten im Rahmen dieser Untersuchung die folgenden Einheitskosten der verschiedenen Unfalltypen festgelegt.

4 Fallstudie

Kategorie a Die Einheitskosten pro Unfall der Kategorie *a* setzen sich aus den entstandenen Sachschäden und den Arbeits- und Materialkosten der Reparatur eines Fahrzeugs zusammen. Das durchschnittliche Alter eines Personenwagens in der Schweiz liegt bei 8.5 Jahren und der durchschnittliche Wert eines solchen Fahrzeuge liegt gemäss TCS bei 15'000 CHF. Die Kosten der Behandlung leichtverletzter Personen wird in dieser Betrachtung, aufgrund ihrer geringen Grösse vernachlässigt, weshalb die pro Unfall entstehenden Kosten der Kategorie *a* mit 15'000 CHF/Unfall angesetzt, werden.

Kategorie b Die Kosten die aufgrund eines Unfalls der Kategorie *b* entstehen, werden durch die anfallenden Behandlungskosten der verunfallten Person bestimmt. Die Kosten durch den Erwerbsausfall für die Dauer der Arbeitsunfähigkeit, sowie die Kosten der entstandenen Sachschäden, werden in dieser Berechnung aufgrund ihrer im Vergleich zu den Behandlungskosten geringen Grösse, vernachlässigt. Die durchschnittlichen Kosten, die durch die Behandlung einer schwerverletzten Person entstehen, werden mit 110'000 CHF/Unfall angesetzt. Dies entspricht 3% der Kosten einer tödlich verunfallten Person.

Kategorie c Diese Kosten, für einen Unfall mit Todesfolge, basieren auf der Schätzung des Werts eines statistischen Lebens. Hierfür werden gemäss dem ASTRA 3.7 Mio. CHF/Unfall angesetzt.

	Unfallkosten $\frac{\text{CHF}}{\text{Unfall}}$
Kategorie <i>a</i>	15'000
Kategorie <i>b</i>	110'000
Kategorie <i>c</i>	3.7 Mio.

Tabelle 4.6: Übersicht der Unfallkosten

4.2.1 Unsichere Einflussfaktoren

Um einen nachhaltige Verbesserung der Verkehrsproblematik in Uster zu erreichen, muss die optimale Lösung die Situation für die nächsten vierzig Jahre verbessern. Damit ein Zeitraum von vierzig Jahren untersucht werden kann, müssen die unsicheren zukünftigen Entwicklungen der wichtigsten Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Die nachfolgende Auflistung stellt die wichtigsten Einflüsse auf die Verkehrssituation am Bahnübergang und somit auf das DTV dar.

- Bevölkerungswachstum
- Zentrumsentwicklung und Verkehrsberuhigung
- Ausbau der Veloparkieranlagen am Bahnhof
- Aufwertung der Quartiere nördlich des Bahnhofs
- Urbane Strassenraumgestaltung im Zentrumsgebiet
- Förderung des Langsamverkehrs gemäss STEK
- Ausbau des Spital und der Sportanlage Buchholz

Alle diese Einflussfaktoren haben gemeinsam, dass einerseits ihre zukünftige Entwicklung und andererseits das Ausmass, in dem sie den DTV in der Zukunft beeinflussen, ungewiss sind. Diese Einflüsse müssen, um die Unsicherheiten hinsichtlich der zukünftigen Mobilitätssituation am Bahnübergang zu berücksichtigen und um eine optimale Lösung für die nächsten vierzig Jahre zu finden, im Rahmen dieser Optimierung modelliert werden.

Da der Verkehr am Bahnübergang hauptsächlich aus Ziel- und Quellverkehr des Zentrums besteht, hat das Bevölkerungswachstum den grössten Einfluss auf das DTV am Bahnübergang. Gemäss STEK, leben in Uster 35'000 Einwohner. Die zu erwartende Entwicklung der Bevölkerung ist abhängig von verschiedenen Faktoren und demnach nur anhand von Prognosen vorhersagbar. Gemäss der Prognosen im STEK wird der Wachstumstrend in Zukunft anhalten. (Geschäftsfeld Stadtraum und Natur 2019)

Der Bau der Uster Westumfahrung sowie der Bau der Moosackerstrasse haben gemäss STEK keinen nennenswerten Einfluss auf die Menge an Autos, die den Bahnübergang Brunnenstrasse in Zukunft passieren werden. Dies folgt, wie im ersten Abschnitt des Kapitel 4 erläutert, der Annahme, dass die Umleitung des Durchgangsverkehr über die Oberlandstrasse bereits nahezu vollständig vollzogen ist und dass der gemessene DTV hauptsächlich aus Quell- und Zielverkehr ins Zentrums besteht. (Geschäftsfeld Stadtraum und Natur 2019)

4.3 Generierung möglicher Lösungen

Die folgenden Varianten habe ich im Rahmen der Optimierung der Verkehrssituation am Bahnübergang Brunnenstrasse erarbeitet, um die Situation für die nächsten vierzig Jahre nachhaltig zu verbessern. Anschliessend an die Darstellung der Varianten folgt eine Übersicht der wichtigsten Eigenschaften und Parameter der Infrastrukturen, die für die Berechnung der Kosten verwendet werden.

Die Gesamtlänge des betrachteten Infrastrukturabschnitts beträgt für alle Varianten 80 Meter.

4.3.1 Variante: 1

Die Variante 1 stellt den Ist-Zustand der Infrastruktur dar. In dieser Variante beträgt die durchschnittliche Wartezeit pro Nutzer, wie in Abschnitt 4.2 erläutert, 5 Minuten. Mit dieser Variante kann der jetzige Zustand der Infrastruktur über den betrachteten Zeitraum von vierzig Jahren untersucht werden und so die Option «keine Veränderung durchführen» überprüft werden.

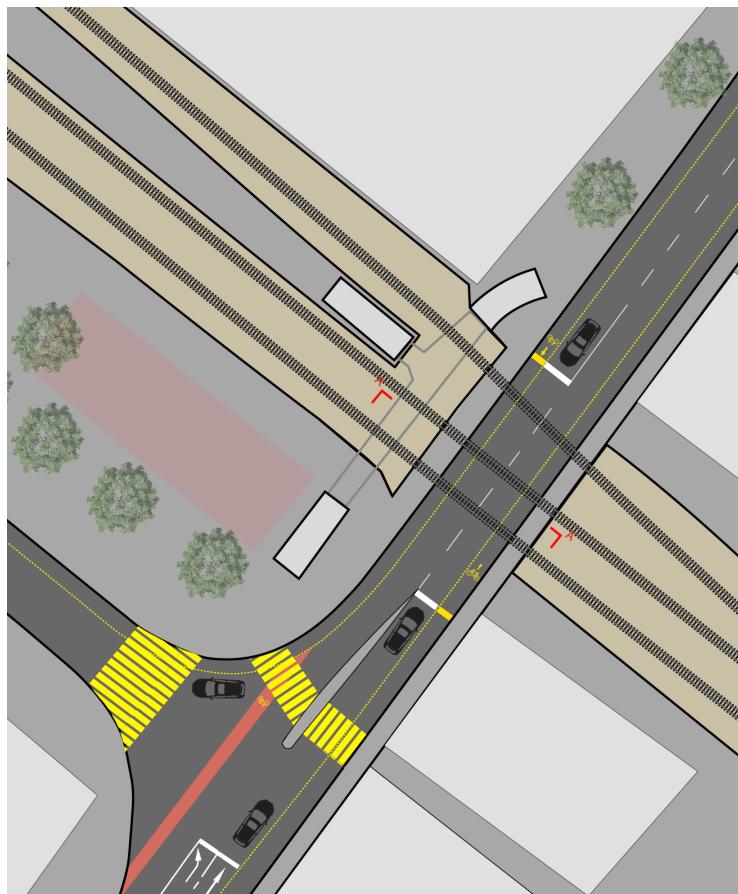


Abbildung 4.5: Übersicht der Variante 1

Um die Verkehrssicherheit der Langsamverkehrsteilnehmer minimal zu erhöhen, ist die Anbringung zweier Velostreifen à je 1.5 Meter Breite geplant. Die angenommene maximale Kapazität der beiden Velostreifen zusammen beträgt 3350 Velos pro Stunde.

Die Anbringung der Velostreifen erfordert eine geringfügige Verjüngung der Fahrbahn von 4 auf 3.5 Meter pro Fahrbahn. Trotz Verjüngung wird angenommen, dass der zweispurige Straßenabschnitt (eine pro Richtung) eine Kapazität von 2'500 Fahrzeugen pro Stunde aufweist, bei einer geplanten, zulässigen Höchstgeschwindigkeit 50 km/h. Unter Berücksichtigung der Situation vor Ort wird angenommen, dass die durchschnittlich gefahrene Geschwindigkeit des MIV 37 km/h beträgt und die der Velofahrer durchschnittlich 15 km/h.

(NACTO. 2018) (Bundesamt für Statistik (BFS) 2017)

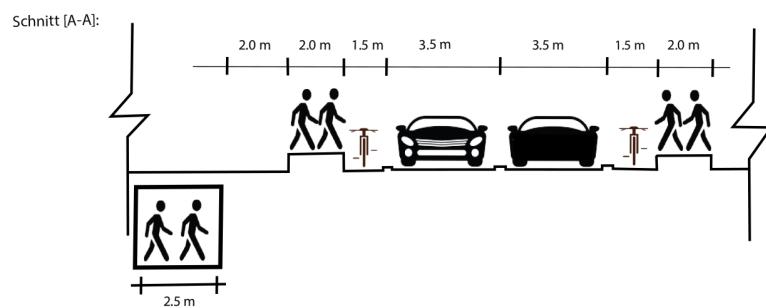


Abbildung 4.6: Querschnitt im Schnitt A-A der Variante 1

Die Erstellung zweier neuer Radstreifen à je 1.5 Meter Breite kostet gemäss Abschnitt 4.2 850 CHF pro Laufmeter. Bei einer Gesamtlänge von 80 Meter ergibt sich für den Bau der Variante 1 Kosten im Bereich von 68'000 CHF. (Kontextplan AG 2010)

4.3.2 Variante: 2

Die zweite Variante beinhaltet, wie in Abbildung 4.7 ersichtlich, den Bau von zwei Velounterführungen, um die lange Wartezeit am Bahnübergang zu verkürzen. Für die Velofahrer entsteht in dieser Variante demnach nur der Zeitverlust gemäss Abschnitt 4.2, der aufgrund des Befahrens der Infrastruktur entsteht. Die für den MIV angesetzte durchschnittliche Wartezeit beträgt weiterhin 5'.

Infolge der Rückklassierung der Brunnenstrasse wird ein Tempo 30 Regime eingeführt. Die angenommene durchschnittlich gefahrene Geschwindigkeit des MIV beträgt somit 30 km/h und für die Velofahrer wird angenommen, dass sie mit durchschnittlich 20 km/h durch die Unterführung fahren können.

(Bundesamt für Statistik (BFS) 2017)

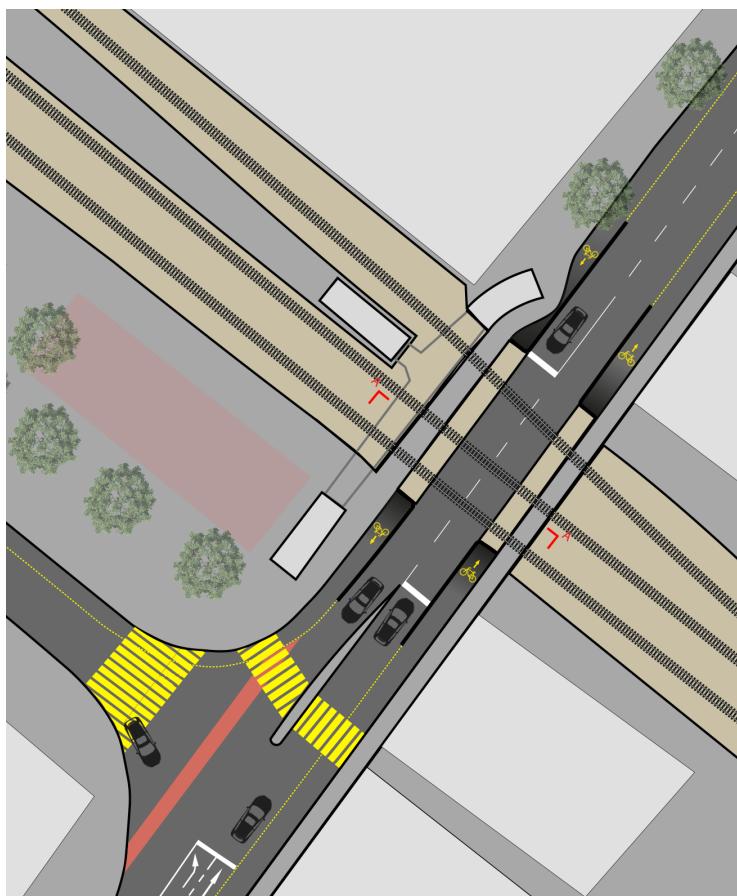


Abbildung 4.7: Übersicht der Variante 2

Durch den Bau der beidseitig mit einer lichten Breite von 1.5 Meter ausgeführten Velounterführungen, wird einerseits die Verkehrssicherheit der Velofahrer verbessert und andererseits die Kapazität der gesamten Veloinfrastruktur auf maximal 3767 Velos pro Stunde erhöht. Die Gesamtlänge einer Unterführung beträgt in dieser Variante 55 Meter. Um diese Unterführung bauen zu können, ist eine weitere Verjüngung der Fahrbahn auf 3 Meter

4.3 Generierung möglicher Lösungen

erforderlich, was jedoch zu keiner Reduktion der Kapazität des MIV führen wird.
(NACTO. 2018)

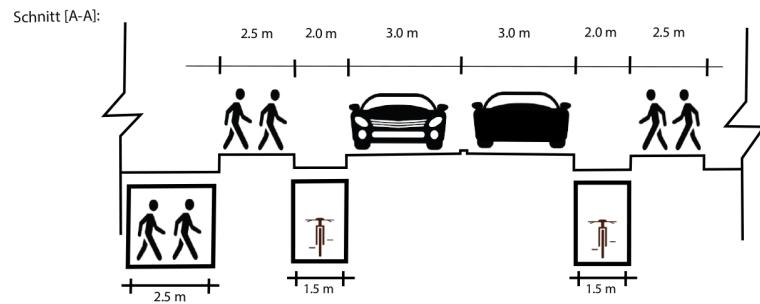


Abbildung 4.8: Querschnitt im Schnitt A-A der Variante 2

Die prognostizierten Baukosten der Variante 2 werden mithilfe der in Abschnitt 4.2 erläuterten Einheitskosten für den Bau einer Velounterführung und den vorgängig erwähnten Abmessungen der Unterführungen berechnet. Die zu erwartenden Baukosten belaufen sich auf 1.16 Mio. CHF, wobei 520'000 CHF für die vier Rampen und 640'000 CHF für den Bau der Unterführungen unter dem Lastfall Eisenbahn sowie das Anbringen der Velostreifen anfallen. (Kontextplan AG 2010)

4.3.3 Variante: 3

Die dritte Variante habe ich ausgehend von der Variante 2 entwickelt und ist ein Versuch die Verkehrssicherheit sowie den Fahrkomfort für die Velofahrer zu steigern. Um dies zu erreichen, wird, wie in Abbildung 4.9 ersichtlich, die Velounterführung zweispurig ausgeführt, was zur Folge hat, dass die Strasse einspurig über den Bahnübergang geführt werden muss. Diese Straßenführung erfordert die Einführung eines Ampelsystems, was die durchschnittliche Wartezeit für den MIV, bei einem Rotlichtzyklus von einer Minute, auf 7 Minuten erhöht. Für das Ampelsystem wäre zusätzlich eine Busbevorzugungsanlage zu prüfen.

Die maximale Höchstgeschwindigkeit beträgt wie in Variante 2 30 km/h , wobei angenommen wird, dass die Velofahrer mit bis zu 30 km/h durch die Unterführung fahren könnten. (Bundesamt für Statistik (BFS) 2017)

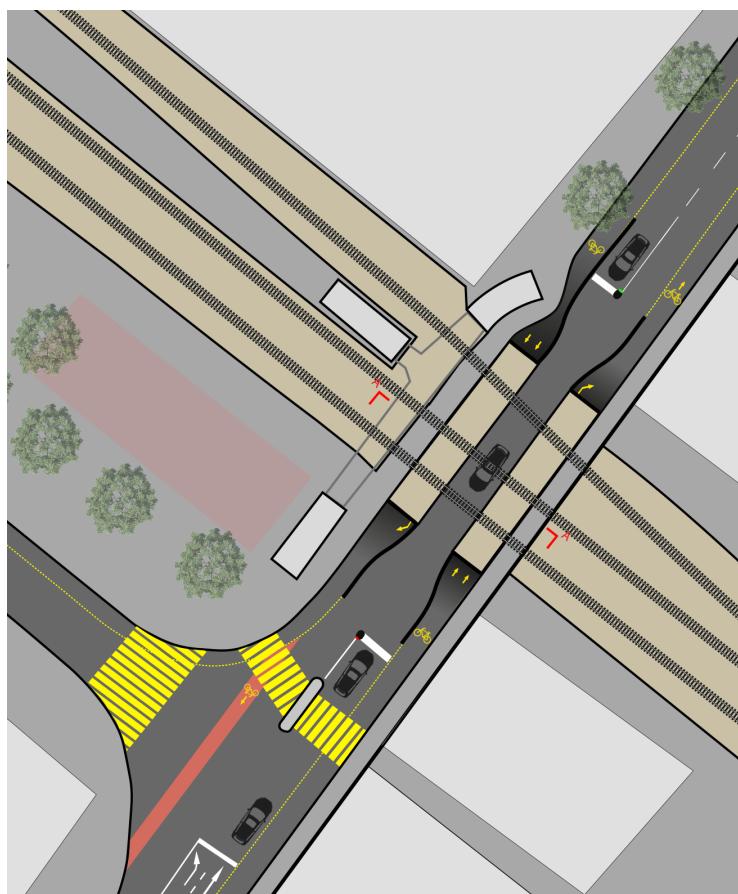


Abbildung 4.9: Übersicht der Variante 3

Die lichte Breite der Velounterführung beträgt 2 Meter und die Gesamtlänge einer Unterführung beläuft sich auf 65 Meter. Die zweispurige Straßenführung wird mit Fahrbahnmarkierungen verdeutlicht. Es wird angenommen, dass durch diese Ausführung die Kapazität der gesamten Veloinfrastruktur auf maximal 4600 Velos pro Stunde erhöht wird. (NACTO. 2018)

4.3 Generierung möglicher Lösungen

Infolge der Reduktion der Strasseninfrastruktur um eine Spur nehme ich, dass sich die Kapazität auf 1'250 Fahrzeuge pro Stunde halbiert. Die Fahrspur bleibt mit 5 Meter für grosse Busse weiterhin problemlos befahrbar.

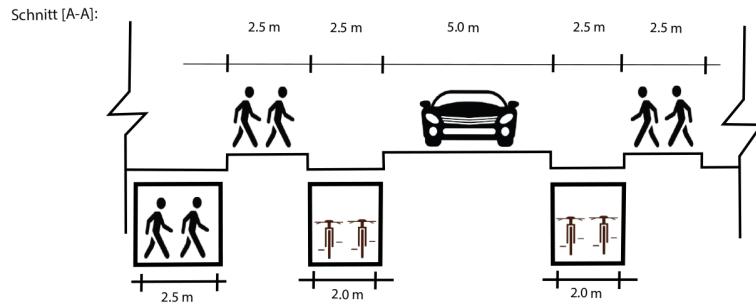


Abbildung 4.10: Querschnitt im Schnitt A-A der Variante 3

Die Baukosten der Variante 3 belaufen sich auf insgesamt 1.51 Mio. CHF und werden wie für Variante 2 berechnet. Für den Bau der Unterführung unter dem Lastfall Eisenbahn und das Anbringen der Velostreifen sind 988'000 CHF vorgesehen und für den Bau der vier Rampen fallen 520'000 CHF an.
(Kontextplan AG 2010)

In Tabelle 4.7 werden die, für die Berechnung der Kosten verwendeten Eigenschaften der Varianten zusammengefasst.

Eigenschaften	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Länge Fahrbahn (m)	80	80	80
Länge Unterführung (m)	-	55	65
Velospuren:	2	2	4
Fahrbahnen	2	2	1
Breite eines Veloweg (m):	1.5	1.5	2
Breite einer Fahrbahn (m):	3.5	3	5
Tempolimit ($\frac{km}{h}$)	50	30	30
<u>\varnothing Geschwindigkeit ($\frac{km}{h}$)</u>			
• Velo	15	20	30
• MIV	37	30	30
<u>Kapazität ($\frac{Fahrzeug}{h}$)</u>			
• Velo	3350	3767	4600
• MIV	2500	2500	1250
<u>Wartezeit (Minuten)</u>			
• Velo	5	5	7
• MIV	5	0	0
Baukosten (CHF)	68'000	1.16 Mio.	1.51 Mio.

Tabelle 4.7: Basis Informationen der Varianten

4.4 Analyse der Lösungen

Um den Vergleich der Varianten zur Bestimmung der optimalen Lösung durchführen zu können, müssen die Kosten anhand der unter Abschnitt 4.2 dargestellten Formeln berechnet werden. Um die Kosten über einen Zeitraum von vierzig Jahren berechnen zu können muss der Einfluss der unter Abschnitt 4.2.1 bestimmten Faktoren auf das DTV modelliert und das DTV für die Zukunft geschätzt werden. Dies geschieht anhand der nachfolgend vorgestellten Szenarien.

4.4.1 Modellierung des DTV

Die Zentrumsentwicklung, die Aufwertung der Quartiere nördlich des Bahnhofs, die Massnahmen zur Verkehrsberuhigung, der Ausbau der Veloparkieranlagen am Bahnhof sowie der Ausbau des Spitals und die im Rahmen der Umsetzung des Leitziels «Uster steigt um!» getroffenen Massnahmen zur Förderung des Langsamverkehrs, haben direkt oder indirekt einen Einfluss auf den Langsamverkehr am Bahnübergang. In Anbetracht der Tatsache, dass alle diese genannten Einflussfaktoren auf die Verkehrssituation am Bahnübergang zu mehr Veloverkehr führen werden, fasse ich diese unter dem Stichwort *Umsetzung STEK* zusammen und modelliere sie mit den in Abschnitt 4.4.1 vorgestellten Szenarien.

Da das Bevölkerungswachstum den grössten Effekt auf das DTV haben wird, untersuche ich diese Einfluss anhand der im Abschnitt 4.4.1 dargestellten Szenarien, separat.

Die zukünftige Situation am Bahnübergang wird somit von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Da diese Einflüsse gleichzeitig auftreten muss, um in der Berechnung der Kosten der Varianten die unsichere zukünftige Entwicklung der Einflussfaktoren berücksichtigen zu können, eine Kombination der entwickelten Szenarien betrachtet werden. Eine solche Kombination stellt ein mögliches zukünftiges Ereignis dar.

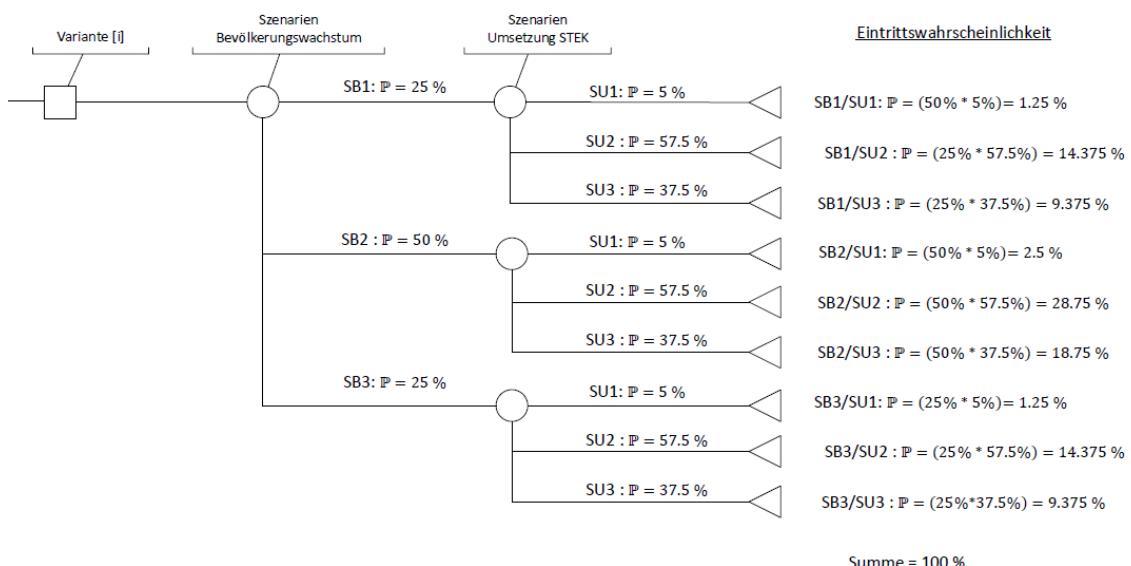


Abbildung 4.11: Übersicht über die Szenarien und ihre Eintrittswahrscheinlichkeiten

Eine Vorhersage über die Zukunft ist nur mit einer gewissen Unsicherheit möglich. Um diese Unsicherheit in die Optimierung miteinzubeziehen, bewerte ich das Eintreten dieser Szenarien mit einer Wahrscheinlichkeit $[0, 1]$, der sogenannten Eintrittswahrscheinlichkeit eines Szenarios.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines kombinierten Szenarios, sprich eines zukünftigen Ereignisses, berechnet sich wie in der Abbildung 4.11 dargestellt aus der Multiplikation der Eintrittswahrscheinlichkeiten der Ausgangsszenarien.

Dies stellt zugleich ein Ausschnitt aus dem Entscheidungsprozess zur Bestimmung der optimalen Lösung dar.

Bevölkerungswachstum

Wie in Kapitel 4 erwähnt, ist das DTV mehrheitlich von der zukünftigen demographischen Entwicklung abhängig. Um den Effekt, den das Bevölkerungswachstum auf das DTV haben wird, modellieren zu können, orientiere ich mich an den Wachstumsprognosen der Stadt Uster. Die zu erwartende Bevölkerungsentwicklung habe ich dem Kapitel 3 *Stadt Uster im Porträt* des STEK entnommen und wird nachfolgend kurz beschrieben.

Stagnation

Geschätzte Anzahl an Einwohner im Jahr 2035: 38'760
 $\Rightarrow + 188$ Einwohner/Jahr
 $\Rightarrow + 0.5\%$ pro Jahr gegenüber 2015

Trend restriktiv

Geschätzte Anzahl an Einwohner im Jahr 2035: 42'260
 $\Rightarrow + 363$ Einwohner/Jahr
 $\Rightarrow + 1\%$ pro Jahr gegenüber 2015

Trend Prosperität

Geschätzte Anzahl an Einwohner im Jahr 2035: 45'620
 $\Rightarrow + 531$ Einwohner/Jahr
 $\Rightarrow + 1.5\%$ pro Jahr gegenüber 2015

Anhand dieser Wachstumsprognosen und unter der Annahme eines linearen Wachstums, definiere ich die drei nachfolgend dargestellten Szenarien. Mit diesen Szenarien werde ich in einem nächsten Schritt den zukünftigen DTV für den MIV und den Langsamverkehr, sprich Veloverkehr, am Bahnübergang Brunnenstrasse ermitteln. Ausgehend vom DTV des MIV im Jahr 2016 und den Wachstumsraten der Szenarien habe ich die jährliche Zunahme an Motorfahrzeugen ermittelt. Im Jahr 2016 lag das DTV des MIV am Bahnübergang bei 12'023 Motorfahrzeugen pro Tag.
(Kanton Zürich 2019a)

- Szenario: SB 1
 - Grundlage: Stagnation \Rightarrow jährliches Wachstum um 0.5%
 - Jährliche Zunahme DTV: 60 Fahrzeuge
 - Eintrittswahrscheinlichkeit: 25%

4 Fallstudie

- Szenario: SB 2
 - Grundlage: Trend restriktiv \Rightarrow jährliches Wachstum um 1 %
 - Jährliche Zunahme DTV: 120 Fahrzeuge
 - Eintrittswahrscheinlichkeit: 50%
- Szenario: SB 3
 - Grundlage: Trend Prosperität \Rightarrow jährliches Wachstum um 1.5%
 - Jährliche Zunahme DTV: 180 Fahrzeuge
 - Eintrittswahrscheinlichkeit: 25%

Die Wahrscheinlichkeit das Szenario SB 2 eintritt und das DTV jährlich um 120 Fahrzeuge zunimmt, bewerte ich mit 50%. Dies erfolgt unter der Annahme, dass der restriktive Trend das minimale Wachstumsziel von 20% wiederspiegelt, welches gemäss dem STEK mit grösster Wahrscheinlichkeit eintreten wird, und da dieses Szenario den kantonalen Prognosen entspricht, erachte ich dieses Szenario als das wahrscheinlichste und bewerte es dementsprechend.

Da es zu einem verstärktem Wachstum von 1.5% und somit zu einer jährlichen Zunahme von 180 Fahrzeugen am DTV kommt, erachte ich nach den Angaben des STEK als unwahrscheinlich, da ein übermässiges Bevölkerungswachstum aufgrund der nur beschränkt vorhandenen Kapazitäten zur Erweiterung der Wohnangebots, nur bedingt möglich ist.

Da es zu einer Stagnation des Bevölkerungswachstums und im Zuge dieser Modellierung zu einem Verkehrswachstum von 0.5% und einer jährlichen Zunahme von 60 Fahrzeugen am DTV kommt, erachte ich in Anbetracht der Prognosen zur demographische Entwicklung im Kanton Zürich, als unwahrscheinlich. Deshalb bewerte ich die Szenarien SB 1 und SB 3 mit jeweils 25%.

Mithilfe der verschiedenen Wachstumsraten WR_s der Szenarien und der Formel 4.12 berechne ich das DTV_i im Jahr t_i .

Der DTV des Jahres 2016 lag, wie oben erwähnt, bei 12'023 Motorfahrzeuge pro Tag. Diesen Wert nutze ich als Start- sowie Basiswert meiner Berechnungen.

$$DTV_i = DTV_{2016} + (t_i - t_{2016}) \cdot [WR_s] \cdot DTV_{2016} \quad (4.12)$$

Da die Anzahl Velos, die den Bahnübergang Brunnenstrasse täglich passieren, nicht von einer Verkehrsmessstelle gezählt werden, muss diese Information aus dem MIV hergeleitet werden. Dies erfolgt mithilfe der Daten der Verkehrsmessstelle an der etwas südlich von Uster gelegenen Seefeldstrasse, welche Niederuster mit Riedikon verbindet. Der im Jahr 2019 gemessen durchschnittliche DTV lag bei 8818 Motorfahrzeugen für das MIV und 913 Velos. Daraus ergibt sich einen Veloanteil von 10.35%.¹²

1. Kanton Zürich 2019b.

2. Kanton Zürich 2019c.

$$\mu = \frac{DTV_{Velo, Seefeldstrasse}}{DTV_{MIV, Seefeldstrasse}}$$

$$DTV_{Velo} = DTV_{MIV} \cdot \mu_{Velo}$$

In den Abbildung 4.12 sind die Ergebnisse meiner Modellierung des DTV am Bahnübergang Brunnenstrasse dargestellt, die ich für die Berechnung der Kosten der Varianten verwenden werde. Eine ausführliche Tabelle aller modellierten DTV-Werte findet sich unter Abschnitt A.1

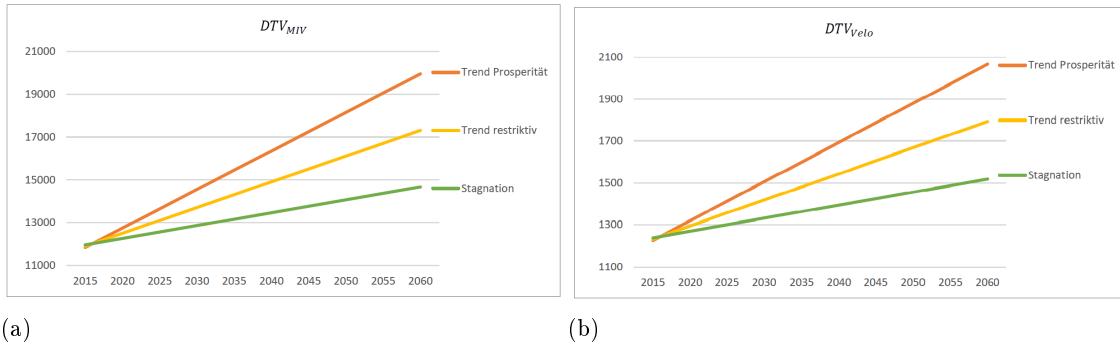


Abbildung 4.12: DTV an der Brunnenstrasse

Umsetzung STEK

Die folgenden Szenarien modellieren die Effekte, den die in Abschnitt 4.4.1 unter dem Stickwort *Umsetzung STEK* zusammengefassten Einflussfaktoren, auf den DTV_{Velo} haben werden.

Das meines Erachtens mit grösster Wahrscheinlichkeit eintretende Szenario entspricht der Verkehrsprognose des Bundes, die eine Zunahme der Verkehrsleistung des Langsamverkehrs bis 2040 gegenüber 2010, um 32% erwartet. (Bundesamt für Raumplanung 2016)

Um die Ober- sowie Untergrenze meiner Prognose ermitteln zu können, orientiere ich mich ein weiteres Mal am STEK. Mithilfe der unter Kapitel 10 *Stadt Uster im Porträt* des STEK vorgestellten Wachstumsprognosen für die Bevölkerungsentwicklung sowie der in Kapitel 7 *Mobilität* des STEK gemäss regionalem Richtplan erstellten Verkehrsprognose für den Anteil der Velofahrer am Gesamtverkehr, erstelle ich zwei weitere Szenarien. Einerseits berücksichtige ich den Fall einer ungenügenden Umsetzung der Leitziele und der daraus resultierenden stagnierenden Entwicklung des Veloverkehrs. Andererseits den Fall einer maximalen Umsetzung aller Ziele in Verbindung mit einer Verschiebung des Innerstädtischen Modalsplit in Richtung Langsamverkehr.

Stagnation

Prognose gemäss STEK: \Rightarrow jährliches Wachstum: 0.54 %

Verkehrsperspektiven 2040

Prognostizierte Zunahme der Verkehrsleistung: 32% \Rightarrow jährliches Wachstum: 1.3

Umsetzung maximal

Prognose gemäss STEK und regionalem Richtplan: \Rightarrow jährliches Wachstum: 2 %

Eine Stagnation erachte ich unter Berücksichtigung der Entwicklung des Langsamverkehrs über die letzten zehn Jahre, als unwahrscheinlich und bewerte das Eintreten dieser Prognose demzufolge mit 5%.

Dass es zu einem Wachstum gemäss der Prognose des Bundes kommen wird, erachte ich nach der Konsultation weitere Verkehrsprognosen, als das Szenario, welches mit grösster Wahrscheinlichkeit eintreten wird. Daher bewerte ich dieses Szenario mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 57.5%.

Dass alle Ziele maximal erfüllt werden und eine Verschiebung des innerstädtischen Modal-Split stattfindet, erachte ich mit 32.5% als deutlich plausibler als die Stagnation, jedoch als unwahrscheinlicher als die Prognose des Bundes.

- Szenario: SU 1
 - Grundlage: Stagnation
 - Eintrittswahrscheinlichkeit: 5%
- Szenario: SB 2
 - Grundlage: Verkehrsperspektiven 2040
 - Eintrittswahrscheinlichkeit: 57.5%
- Szenario: SB 3
 - Grundlage: Umsetzung maximal
 - Eintrittswahrscheinlichkeit: 32.5%

Anhand der zu Beginn dieses Abschnitts definierten Wachstumsraten, sowie ausgehend von den Messwerten des täglichen Veloverkehrs im Jahr 2016, habe ich die Anzahl Velos, die in jedem Szenario zusätzlich pro Tag auf der Infrastruktur unterwegs sein werden, ermittelt. Die Anzahl Velos die im Jahr 2016 täglich den Bahnübergang nutzten, lag, gemäss Abschnitt 4.4.1, bei 1245.

Das Szenario SU 1 führt somit zu einer Erhöhung des täglichen Veloverkehrs um 7 Velos pro Jahr, das Szenario SU 2 zu einer Zunahme von 16 Velos pro Jahr und das Szenario SB 3 zu einer Erhöhung des DTV_{Velo} um 25 Velos pro Jahr. Mit diesen Angaben berechne ich die Anzahl Velos, die je nach Szenario, zusätzlich zu den in Abschnitt 4.4.1 berechneten DTV-Werten, auf der Infrastruktur unterwegs sein werden.

4.4.2 Berechnung der Kosten der Varianten

Die Abbildung 4.13 zeigt die Kostenberechnung der ersten 8 Jahre am Beispiel der Variante 1 im Szenario SB1/SU1. Die Ermittlung der Gesamtkosten einer Variante in einem Szenario erfolgt anhand der Berechnung der Zielfunktion, über den betrachteten Zeitraum von vierzig Jahren. Übersichtshalber zeige ich die Formel 4.13 der Zielfunktion erneut.

$$\text{Min. } K = \text{Min. } [K_W + K_B + K_{TT} + K_E + K_A] \quad (4.13)$$

Variante: 1 Szenario: SB2/SU2	Jahr:	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
	DTV_{MIV}	12384	12504	12624	12744	12865	12985	13105	13225	13346
	$t_{MIV} [h]$	0.08549608	0.08549611	0.08549613	0.08549616	0.08549618	0.08549621	0.08549623	0.08549626	0.08549629
DTV_{Velo}		1298	1311	1323	1336	1348	1360	1373	1385	1398
	$t_{Velo} [h]$	0.088666667	0.088666667	0.088666667	0.088666667	0.088666667	0.088666667	0.088666667	0.088666667	0.088666667
Besitzer	Wartungskosten	-	72'000	4'000	4'000	4'000	4'000	4'000	4'000	4'000
Nutzer	Betriebskosten	258809	261321	263833	266345	268857	271369	273881	276393	278905
	Reisezeitkosten	13008470	13134670	13260870	13387070	13513271	13639472	13765673	13891874	14018075
Öffentlichkeit	Umweltkosten	17'527	17'257	16'984	16'707	16'426	16'143	15'855	15'564	15'270
	Unfallkosten	8320	8400	8481	8561	8641	8722	8802	8883	8963
	Totalen Kosten pro Jahr	CHF 13'354'619	CHF 13'230'261	CHF 13'226'384	CHF 13'290'503	CHF 13'354'619	CHF 13'418'731	CHF 13'482'840	CHF 13'546'946	CHF 13'611'048
Gesamtkosten bis 2060		CHF 721'119'073								

Abbildung 4.13: Beispiel der Kostenberechnung

Die jährlichen DTV Werte sind gemäss dem Abschnitt 4.4.1 berechnet und die Reisezeitverluste t gemäss Abschnitt 4.2. Nach 4.2 werden die Wartungskosten berechnet. Die Berechnung der Wartungskosten erfolgt mit den in Abschnitt 4.3 beschriebenen Abmessungen der Variante. Die im Jahr 2020 anfallenden Interventionskosten belaufen sich gemäss Abschnitt 4.3 auf 68'000 CHF.

Die Betriebskosten der Nutzer werden gemäss Abschnitt 4.2 berechnet, dies erfolgt durch die Multiplikation des DTV mit der Länge der jeweiligen Fahrbahn und den Einheitskosten des Fahrzeugbetriebs. Um die Kosten eines Jahres zu ermitteln, wird der berechnete Wert mit 365 multipliziert.

Die weiteren Kosten der Nutzer sind die Reisezeitkosten, die nach Abschnitt 4.2 berechnet werden. Hierfür wird der im oberen Bereich der Tabelle dargestellte Zeitverlust pro Nutzer, berechnet aus dem Zeitverlust, der durch das Befahren der Infrastruktur und durch die durchschnittliche Wartezeit aufgrund der Bahnschranke gemäss Abschnitt 4.2 entsteht, mit dem DTV und den Einheitskosten des Zeitverlust, multipliziert.

Die Berechnung der Umweltkosten erfolgt nach Abschnitt 4.2 durch die Multiplikation des DTV mit den Einheitskosten und der Länge der Fahrbahn. Im Fall der Schadstoffbelastungskosten wird, vom DTV_{MIV} der jährliche E-Auto Anteil abgezogen.

Die Berechnung der Unfallkosten erfolgt pro Unfallkategorie und Fahrzeugtyp durch die Multiplikation des DTV mit der Länge der Fahrbahn den Unfallrisiken gemäss Abschnitt 4.2. Daraus ergibt sich die jeweilige Unfallanzahl nach Unfallart. Diese werden mit den Einheitskosten der jeweiligen Unfallart multipliziert und die berechneten Kosten, um die totalen Unfallkosten zu ermitteln, aufsummiert. Im Anhang unter Abschnitt A.2 sind die

4 Fallstudie

Tabellen der berechneten Kosten für die Varianten 1, 2 und 3 mit den Grundannahmen der Kostenstruktur aufgeführt.

4.5 Bewertung der Lösungen

Da die berechneten Kosten einer Variante in einem Szenario vom jeweiligen Szenario abhängt, müssen, um eine von den Szenarien unabhängige Bewertung der Varianten vornehmen zu können, die berechneten Kosten mit den Eintrittswahrscheinlichkeit des jeweiligen Szenarios gewichtet werden. Diese wahrscheinlichkeitsgewichteten Kosten, die aufgrund der Ausführung einer Variante in einem der Szenarien entstehen, nenne ich im Rahmen dieser Untersuchung: Risiko.

Dies geschieht, um die Unsicherheiten, welche bei der Vorhersage der Wahrscheinlichkeit des Eintretens der Szenarien entstehen, in die Bewertung der Varianten miteinflussen zu lassen.

Als letzter Schritt der Bewertung wird mit Hilfe der Sensitivitätsanalysen der rechten Seite der Zielfunktion, die Robustheit der gefundenen optimalen Lösung überprüft sowie die Abhängigkeit von den getroffenen Annahmen aufgezeigt.

4.5.1 Berechnung der Risiken der Varianten

Wie im vorangegangenen Abschnitt erwähnt, berechnet sich das Risiko einer Variante in einem Szenario, durch die Multiplikation der Eintrittswahrscheinlichkeit des Szenarios mit den für die jeweilige Variante im betrachteten Szenario berechneten Kosten. Das Gesamtrisiko, das von der Durchführung einer Variante ausgeht, setzt sich somit aus der Summe aller Risiken einer Variante zusammen. Anhand der nachfolgenden Abbildung 4.14 wird als Beispiel die Berechnung des Risikos der Variante 1, mithilfe eines Entscheidungsbaums gezeigt. Die Berechnung erfolgt in diesem Fall von rechts nach links.

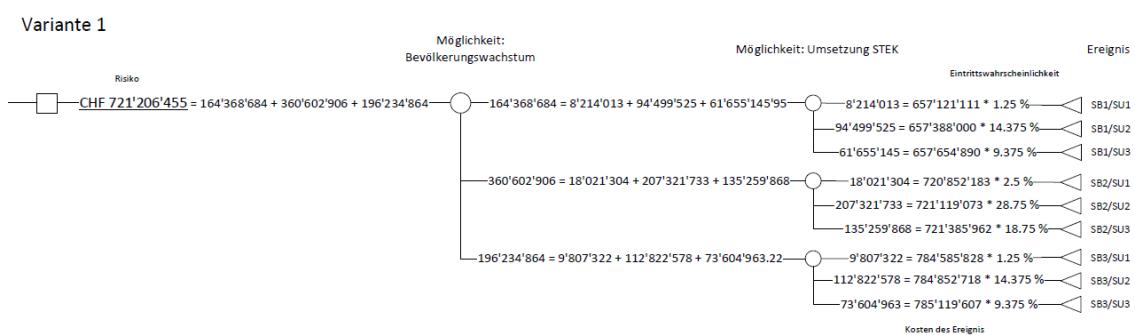


Abbildung 4.14: Beispiel der Risikoberechnung

4.5.2 Sensitivitätsanalyse

Wie im Abschnitt 2.5 erläutert, wird mithilfe der Sensitivitätsanalysen, die in einem ersten Schritt ermittelte Lösung, weiter untersucht, um die Belastbarkeit der Ergebnisse in einer allfälligen Diskussion der Varianten zu stärken. Da auf die Phase der Erarbeitung einer Infrastruktur Intervention eine politische Diskussion folgt, die den weiteren Verlauf des Projekts massgeblich bestimmt, ist eine vertiefte Untersuchung der Ergebnisse unerlässlich. Dies dient der Erarbeitung einer Argumentationsbasis für die Verteidigung der bevorzugten optimalen Variante.

In diesem Schritt werden die Parameter der Risikoberechnung verändert, die im Rahmen der politischen Auseinandersetzung das grösste Diskussionspotential bieten. Die nachfolgenden Abschnitte umschreiben die durchgeführten Sensitivitätsanalysen und stellen die jeweiligen veränderten Parameter dar.

Grundzustand Im Grundzustand der Parameterwahl bleiben die Parameter unverändert. Dieser Zustand ist der Referenzwert der Sensitivitätsanalyse.

Parameterauswahl 1 Da der im Grundzustand angenommene E-Auto Anteil eine progressive Prognose ist, erachte ich eine differenzierte Untersuchung für angebracht. So simuliert die Parameterauswahl 1 eine konservative Prognose des E-Auto Anteils im Jahr 2050 von 50%. Wie in Abschnitt 4.2, habe ich unter der Annahme eines linearen Wachstums, den in Abbildung 4.15 dargestellten jährlichen E-Auto Anteil $\Phi_{E-Autos}$ berechnet.

(BFS und ASTRA 2019)

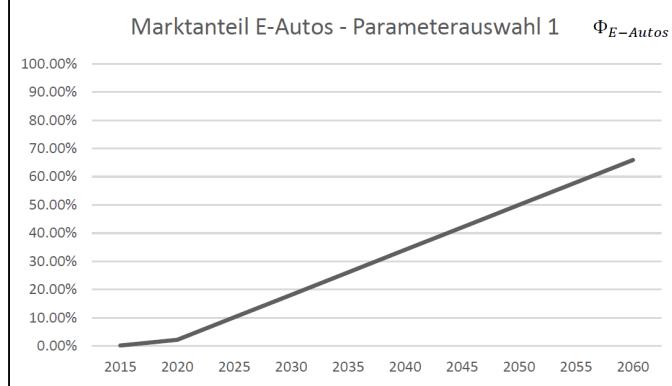


Abbildung 4.15: Marktanteil der E-Autos am Fahrzeugbestand - Parameterauswahl 1

Parameterauswahl 2 Da ich die Unfallwahrscheinlichkeiten anhand der gesamtschweizerischen Unfalldaten und Leistungen des Personenverkehrs berechne, erachte ich eine vertiefte Untersuchung dieser Parameter als notwendig. Um die effektive Gefahrenlage am Bahnübergang zu simulieren, verändere ich in der Parameterauswahl 2 die Unfallwahrscheinlichkeiten.

4 Fallstudie

Um in der Variante 2 zu berücksichtigen, dass die erhöhte Durchfahrtsgeschwindigkeit in Verbindung mit der geringen Breite der Unterführung ein gewisses Sicherheitsrisiko darstellt, wird die Unfallwahrscheinlichkeit der Velofahrer um 50% erhöht.

Im gleichen Schritt habe ich, unter der Annahme, dass die Einführung eines Ampelsystems und die dementsprechende einspurige Verkehrsführung, die Anzahl Unfälle auf dem Bahnübergang mit MIV-Beteiligung merklich reduziert sollte, die Unfallwahrscheinlichkeit des MIV wird in der Variante 3 demnach um 50% gesenkt.

Die ermittelten Unfallrisiken für die Parameterauswahl 2 sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

	Unfalltyp a		Unfalltyp b		Unfalltyp c		Änderung gegenüber Grundzustand
	MIV	Velo	MIV	Velo	MIV	Velo	
Variante 1	$1.222 \cdot 10^{-7}$	$1.117 \cdot 10^{-6}$	$1.915 \cdot 10^{-8}$	$3.484 \cdot 10^{-7}$	$1.171 \cdot 10^{-9}$	$1.032 \cdot 10^{-8}$	0%
Variante 2	$1.222 \cdot 10^{-7}$	$1.676 \cdot 10^{-6}$	$1.915 \cdot 10^{-8}$	$5.226 \cdot 10^{-7}$	$1.171 \cdot 10^{-9}$	$1.548 \cdot 10^{-8}$	+ 50% für $\gamma_{Velo,n}$
Variante 3	$5.853 \cdot 10^{-10}$	$1.117 \cdot 10^{-6}$	$9.576 \cdot 10^{-9}$	$3.484 \cdot 10^{-7}$	$6.108 \cdot 10^{-8}$	$1.032 \cdot 10^{-8}$	- 50% für $\gamma_{MIV,n}$

Tabelle 4.8: Tabelle der Unfallrisiken $\gamma_{j,n} \left[\frac{\text{Unfälle}_{j,n}}{\text{Pkm}_j} \right]$ - Parameterauswahl 2

Parameterauswahl 3 Die Eintrittswahrscheinlichkeiten im Grundzustand habe ich anhand von Prognosen gesetzt. Um zu untersuchen welchen Effekt die Veränderung der Eintrittswahrscheinlichkeiten der Szenarien, auf die optimale Lösung hat, verändere ich in der Parameterauswahl 3 die angenommen Eintrittswahrscheinlichkeiten. Die Eintrittswahrscheinlichkeit sind, wie in Abbildung 4.16 ersichtlich, so verteilt, dass den Szenarien mit den grössten Wachstumsprognosen mehr Gewicht gegeben wird.

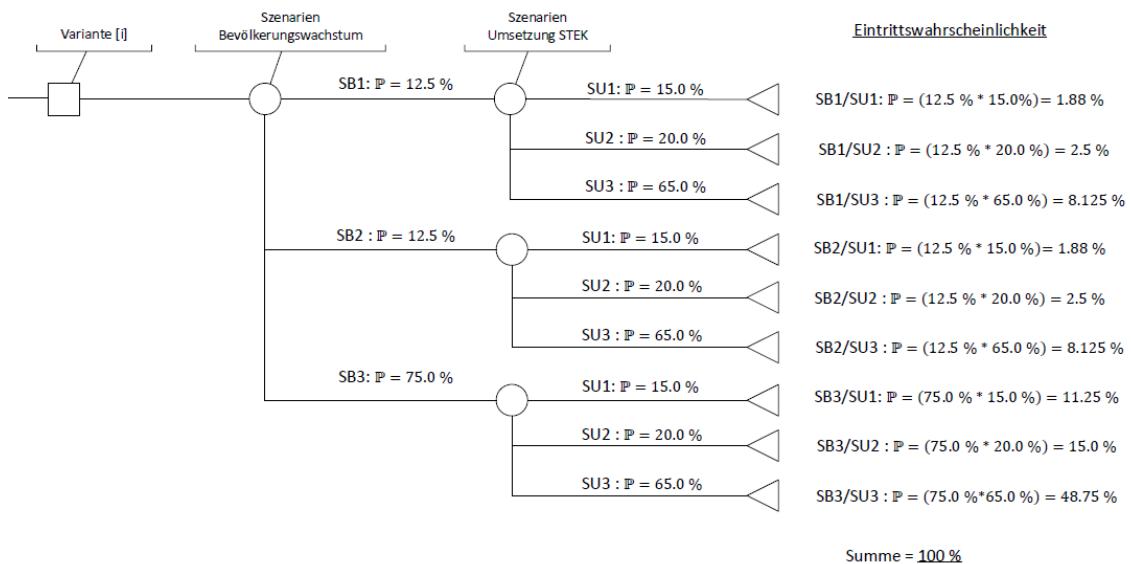


Abbildung 4.16: Übersicht über die Szenarien und ihre Eintrittswahrscheinlichkeiten - Parameterauswahl 3

Parameterauswahl 4 Um den Faktor Reisezeit genauer zu untersuchen und zu analysieren welchen Effekt die Veränderung der Reisezeit auf das Ergebnis hat, habe ich die prognostizierte durchschnittliche Wartezeit der Variante 3 von 7' auf 5' gesenkt, unter der Annahme, dass das eingeführte Ampelsystem zu keiner zusätzlichen Wartezeit führen wird.

5 Resultate

Um die Verkehrssituation am Bahnübergang Brunnenstrasse nachhaltig zu verbessern, bedarf es einer optimalen Variante, die durch den Vergleich der gemäss Abschnitt 4.5.1 berechneten Risiken der Varianten bestimmt wird. Nachfolgend dargestellt sind die Resultate der Risikoberechnung sowie der Risikovergleich und für die verschiedenen Sensitivitätsanalysen die als optimal bestimmte Variante.

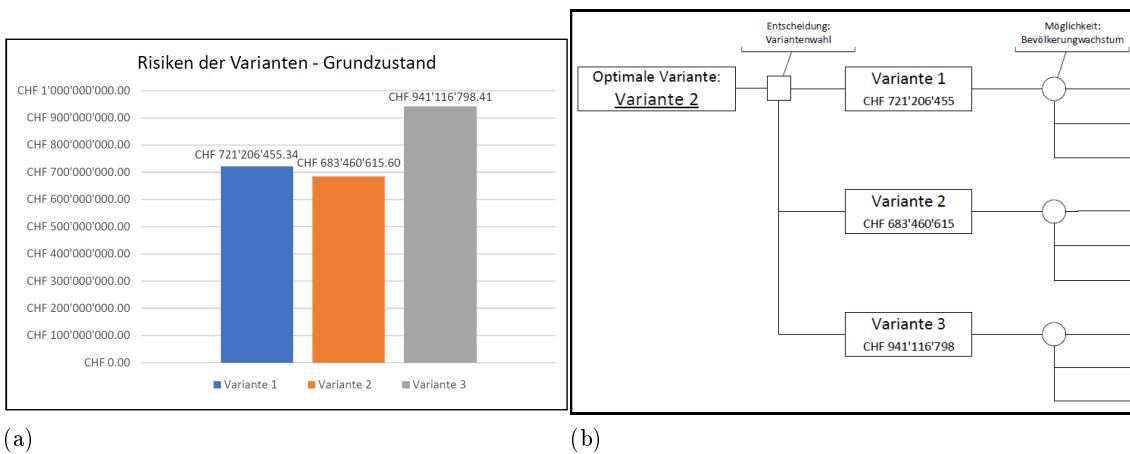


Abbildung 5.1: Risikovergleich und Entscheidungsprozess im Grundzustand

Grundzustand Wie in der Abbildung ?? ersichtlich, beträgt das Risiko der Variante 1 im Grundzustand 721'206'455 CHF, das Risiko der Variante 2 683'460'615 CHF und das Risiko der Variante 3 941'116'798 CHF. Das Risiko der Variante 2 ist somit um 37'745'840 CHF geringer als das Risiko der Variante 1 und um 257'656'183 CHF kleiner als das Risiko der Variante 3. Die Differenz der Risiken der Varianten 1 und 3 beträgt 219'910'343 CHF. Die Variante mit dem geringsten Risiko im Grundzustand ist demnach Variante 2 und ist dementsprechend die optimale Variante, wie in Abbildung 5.1 dargestellt.

Parameterauswahl 1, 2 und 3 Die nachfolgende Abbildung 5.2 stellt die Risiken der Varianten für die Parameterauswahl 1, 2 und 3 dar. Es ist klar ersichtlich, dass sich in der Parameterauswahl 1, 2 und 3 keine Veränderung ergibt und weiterhin die Variante 2 die optimale Lösung darstellt. Aus diesem Grund verzichte ich auf die ausführliche Darstellung und verweise auf das Kapitel 6 in dem ich die verschiedenen Parameterauswahlen ausführlich vergleiche und diskutiere.

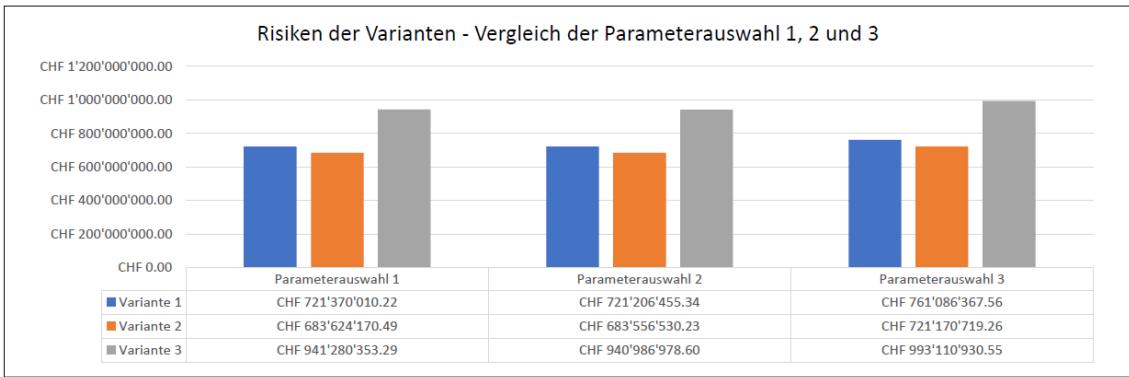


Abbildung 5.2: Risikovergleich der Varianten - Parameterauswahl 1, 2 und 3

Parameterauswahl 4 Für die Parameterauswahl 4 beträgt das Risiko der Variante 1 wie im Grundzustand 721'206'455 CHF. Das Risiko der Variante 2 beträgt 683'460'616 CHF und das Risiko der Variante 3 ist mit 683'422'520 CHF deutlich niedriger als im Grundzustand. In Abbildung 5.3b wird der Vergleich der Varianten 2 und 3 gezeigt, wo man erkennen kann, dass die Differenz der berechneten Risiken 38'095 CHF beträgt.

Aufgrund der berechneten Risiken für die Parameterauswahl 4 und unter den getroffenen Annahmen, ist die Variante 3 die optimale Lösung zur bedarfsgerechten Verbesserung der Verkehrssituation am Bahnübergang. Eine Diskussion dieser Lösung folgt im Kapitel 6.

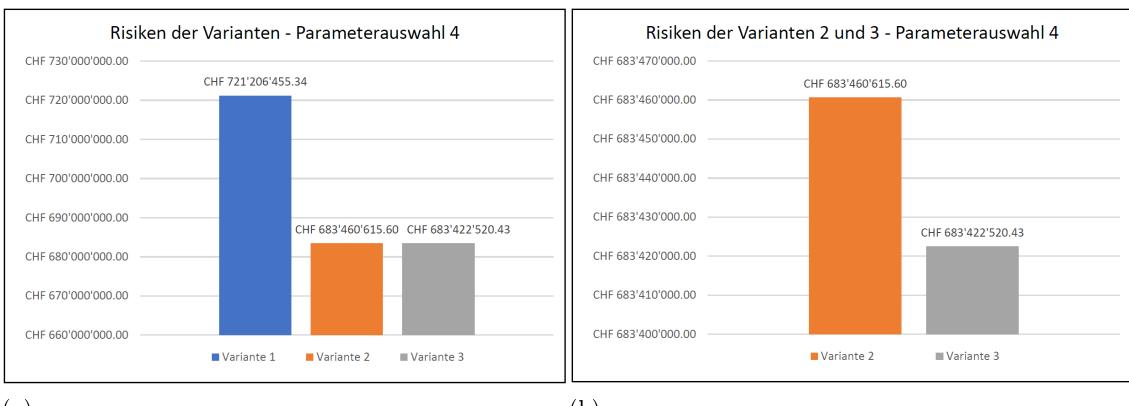


Abbildung 5.3: Risikovergleich für die Parameterauswahl 4

6 Diskussion

In diesem Kapitel wird die in Kapitel 5 als optimal erachtete Lösung untersucht. Einerseits werden die Parameterauswahlen 1 bis 4 mit dem Grundzustand verglichen und andererseits werden die einzelnen Kostenstrukturen der verschiedenen Parameterauswahlen untersucht. Dies geschieht, um die als optimal erachtete Variante auf ihre Belastbarkeit zu prüfen.

Grundzustand Gemäss dem Risikovergleich in Kapitel 5 ist im Grundzustand die bestmögliche Variante für die Zukunft von Uster die Variante 2. Bei näherer Betrachtung der in Abbildung 6.1 dargestellten Reisezeitkosten und Wartungskosten der Varianten wird deutlich, dass die Kosten die in der Variante 1 aufgrund der verlängerten Wartezeit entstehen, die Mehrkosten der Variante 2 infolge Bau und Wartung in einen Zeitraum von 40 Jahren um ein Vielfaches übersteigen. Die Mehrkosten, die bei der Ausführung der Variante 2 infolge höherer Bau- und Wartungskosten entstehen, betragen 1'238'600 CHF. Die Mehrkosten, die bei der Variante 1 aufgrund der höheren Reisezeitkosten entstehen betragen 38'984'439 CHF.

Durch diesen Vergleich wird deutlich, dass sich die Variante 1, welche die Option «nichts zu verändern» darstellt, über den betrachteten Zeitraum von 40 Jahren nicht lohnen wird. Die Mehrkosten, die den Nutzern des Bahnübergangs und somit auch indirekt der Stadt Uster infolge der verlängerten Wartezeit entstehen, übersteigen die erforderlichen Investitionskosten für den Bau der Velounterführung um ein Vielfaches. Im Fall der Variante 3 trifft dies nicht zu, weshalb sich ein solches Investment unter den Annahmen des Grundzustandes nicht lohnt.

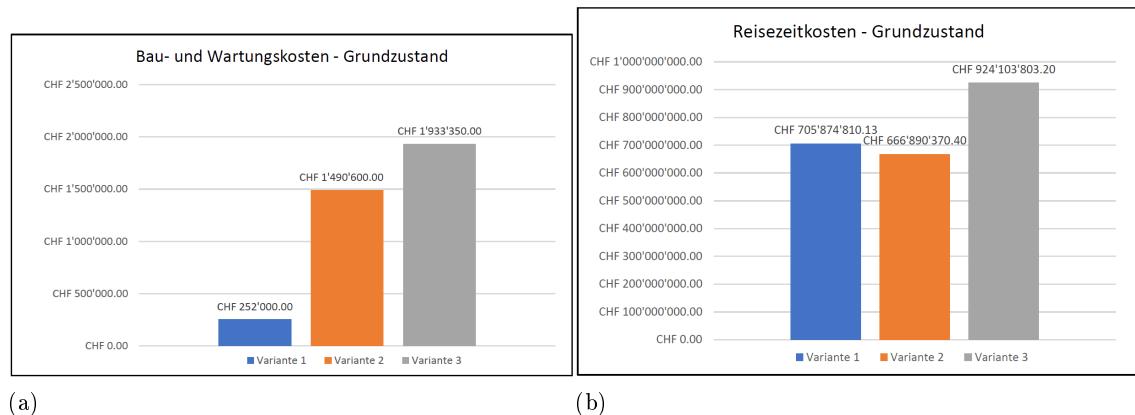


Abbildung 6.1: Kostenvergleich im Grundzustand

Die Kosten wurden analog der in Abschnitt 4.5.1 erläuterten Risikoberechnung ermittelt. Dies gilt für alle weiteren erwähnten Kostenstrukturen.

Demnach lohnt sich der Bau der Variante 2 für die Stadt Uster bei einer Betrachtung der Gesamtkosten über 40 Jahre. Das minimierte Risiko rechtfertigt die höheren Investitionskosten zu Beginn des untersuchten Zeitraums.

Parameterauswahl 1: Veränderung E-Auto Anteil Gemäss Kapitel 5 ist auch in der Parameterauswahl 1 die Variante 2 die optimale Lösung. Somit hat die Veränderung des E-Auto Anteiles keinen Einfluss auf die Wahl der optimalen Variante.

Infolge des Vergleichs des Grundzustandes und der Parameterauswahl 1 ist ersichtlich, dass das Risiko der Variante 1 um 0.023%, das Risiko der Varianten 2 um 0.024% und das Risiko der Variante 3 um 0.017% gegenüber dem jeweiligen Risiko im Grundzustand ansteigt. Diese Abweichungen wären, um den Effekt der die Veränderung des E-Auto Anteiles auf optimale Lösung hat, im Rahmen einer Hauptstudie zu untersuchen.

Bei der näheren Betrachtung der Umweltkosten wird ersichtlich, dass die Umweltkosten für alle 3 Varianten jeweils um einen Betrag von 163'555 CHF ansteigen. Eine konservative Prognose des E-Auto Anteil hat somit keinen Einfluss auf die Wahl der optimalen Variante. Demnach müsste die Variante 2 auch in einer Zukunft in der der Verbrennungsmotor weiterhin eine massgebende Rolle spielen wird, die als optimal zu erachtende Variante sein, um die Verkehrssituation am Bahnübergang nachhaltig zu verbessern.

Parameterauswahl 2: Veränderung der Unfallwahrscheinlichkeit Wie im Kapitel 5 dargestellt, hat die Veränderung der Unfallwahrscheinlichkeit keinen Einfluss auf die Wahl der optimalen Variante. Bei näherer Betrachtung der Unfallkosten, sieht man, dass sich die Veränderung der Unfallwahrscheinlichkeit deutlich auf die anfallenden Unfallkosten auswirkt.

Die Abbildung 6.2 zeigt den Unfallkostenvergleich des Grundzustandes und der Parameterauswahl 2. Die Unfallkosten aller Varianten im Grundzustand betragen 451'469 CHF. In der Parameterauswahl 2 betragen die Unfallkosten der Variante 2 547'384 CHF und die Unfallkosten der Variante 3 321'649 CHF. Für die Variante 2 entspricht das einer Veränderung von 21.25% und für die Variante 3 einer Abnahme von 28.75%.

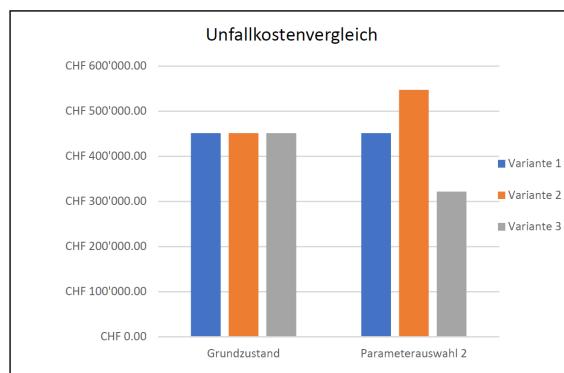


Abbildung 6.2: Unfallkostenvergleich des Grundzustandes und der Parameterauswahl 2

6 Diskussion

Betrachtet man hingegen die Veränderung der Risiken der Variante vom Grundzustand zur Parameterauswahl 2, so beträgt die Veränderung für die Variante 1 +0.01% und für die Variante 3 -0.01%. Somit ist die Variante 2 auch mit erhöhter Unfallgefahr die optimale Variante für die zukünftige Situation am Bahnübergang Brunnenstrasse.

Parameterauswahl 3: Veränderung der Eintrittswahrscheinlichkeit Die Veränderung der Eintrittswahrscheinlichkeit, wie in Abschnitt 4.5.2 dargestellt, hat keinen Einfluss auf die Wahl der optimalen Variante. Jedoch ist die folgende Darstellung 6.3 der Risiken der einzelnen Szenarien, insofern interessant, dass es den Effekt verdeutlicht, den die Wahl der Eintrittswahrscheinlichkeit auf die Verteilung der Risiken hat. So können mit der Gewichtung der möglichen zukünftigen Ereignisse, sprich den Prognosen der möglichen Zukunft, die berechneten Risiken beeinflusst werden.

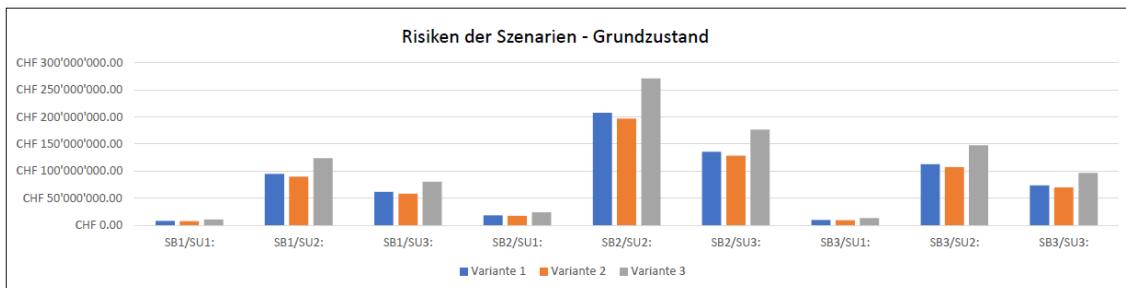


Abbildung 6.3: Vergleich der Risiken der Szenarien im Grundzustand

In der Parameterauswahl 3 wird der Schwerpunkt der Gewichtung der Szenarien so gelegt, dass diejenigen Szenarien mehr Gewicht erhalten, welche die höchsten Wachstumsprognosen voraussagen und demnach das grösste Verkehrsaufkommen implizieren. Der Effekt einer solchen Verschiebung auf die Szenarien wird in der nachfolgenden Abbildung 6.4 dargestellt.

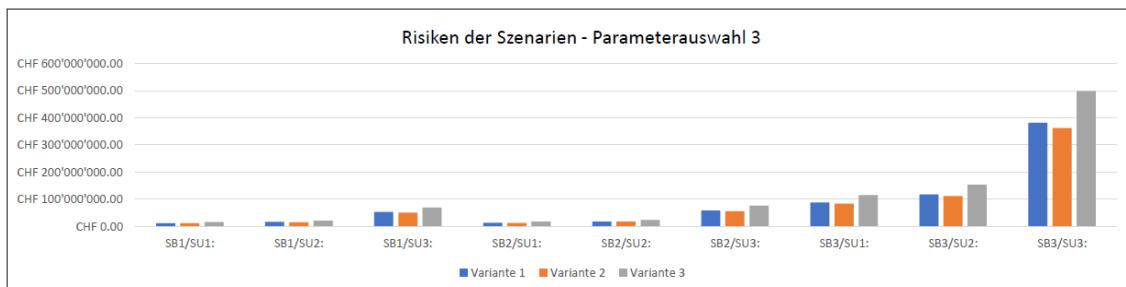


Abbildung 6.4: Vergleich der Risiken der Szenarien für die Parameterauswahl 3

Auf die Wahl der optimalen Variante hat diese Veränderung keinen Einfluss, da die Risiken der Varianten jeweils um 5.5% im Vergleich zum Grundzustand steigen. Erst bei der Betrachtung der Nachkommastellen, lässt sich eine gewisse Unterscheidung feststellen. So beträgt die Veränderung des Risiko der Variante 1 vom Grundzustand zur Parameterauswahl 3 5.530%, die Veränderung des Risiko der Variante 2 beträgt 5.518% und die Veränderung des Risikos der Variante 3 5.525%. Aus diesen geringfügigen Abweichungen

einen Rückschluss auf die im Rahmen der Parameterauswahl 3 veränderten Eigenschaften der Risikoberechnung zu machen, war im Rahmen dieser Projektarbeit nicht möglich und wäre im Rahmen einer Hauptstudie weiter zu untersuchen.

Parameterauswahl 4: Veränderung der Reisezeit Wie in Kapitel 5 ermittelt, ist in der Parameterauswahl 4 das Risiko der Variante 3 um 38'095 CHF kleiner als das Risiko der Variante 2. Das Risiko der Variante 1 bleibt unverändert und aufgrund dessen ist die optimale Variante für die Parameterauswahl 4 die Variante 3.

Die getroffenen Annahme über die Wartezeit der Variante 3 für die Parameterauswahl 4 vernachlässigt das Ampelsystem und berücksichtigt demnach nicht, eine verlängerte Reisezeit aufgrund der Rotlichtzyklen des Ampelsystems.

Den Einfluss dieser Veränderung sieht man verdeutlicht bei den Reisezeitkosten. So nehmen die Reisezeitkosten der Variante 3 vom Grundzustand zur Parameterauswahl 4 um 257'694'277 CHF ab, wie in Abbildung 6.5 ersichtlich ist. Die Reisezeitkosten der Varianten 1 und 2 bleiben für die Parameterauswahl 4 unverändert, da ihre gemäss Abschnitt 4.2 definierten Parameter der Kostenberechnung nicht verändert werden. So betragen die Reisezeitkosten der Variante 1 sowohl im Grundzustand als auch für die Parameterauswahl 4 705'874'810 CHF und die Reisezeitkosten der Variante 2 666'890'370 CHF.

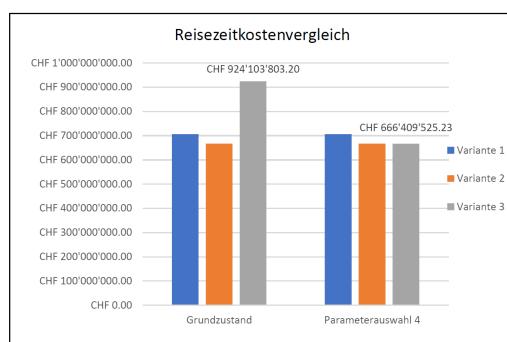


Abbildung 6.5: Reisezeitkostenvergleich Grundzustand und Parameterauswahl 4

Bei näherer Betrachtung der Reisezeitkosten der Variante 2 und Variante 3 wird deutlich weshalb die Variante 3 für die Parameterauswahl 4 das geringste Risiko generiert.

In Abbildung 6.6 ist ersichtlich, dass die Reisezeitkosten der Variante 2 666'890'370 CHF betragen und die Reisezeitkosten der Variante 3 für die Parameterauswahl 4 nur noch 666'409'525 CHF. So nehmen die Reisezeitkosten der Variante 3 in der Parameterauswahl 4 um 27.89% gegenüber dem Grundzustand ab. Das Risiko hingegen der Variante 3 für die Parameterauswahl 4 nimmt um 27.38% gegenüber dem Risiko im Grundzustand ab.

Die Differenz der Reisezeitkosten der Varianten 2 und 3 beträgt 480'845 CHF, wobei die Differenz der Risiken der Varianten 2 und 3 in der Parameterauswahl 4 gemäss Kapitel 5 38'095 beträgt. So wird deutlich, dass einerseits die Reisezeit der entscheidende Faktor für die Risikoberechnung ist und andererseits, dass die im Rahmen der Optimierung des Bahnübergangs Brunnenstrasse notwendigen Entscheidungsprozesse von den Annahmen der zu erwartenden Reisezeiten abhängig sind. Des weiteren ist ersichtlich, dass die Mehrkosten die beim Bau der Variante 3 im Vergleich zu Variante 2 entstehen, gemäss Abschnitt 4.3

6 Diskussion

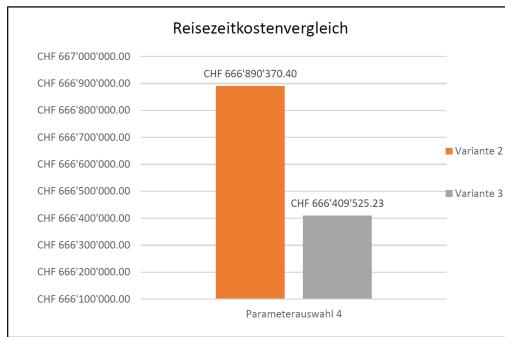


Abbildung 6.6: Reisezeitkostenvergleich Variante 2 und 3 für die Parameterauswahl 4

347'750 CHF, von den grösseren Reisezeitkosten der Variante 2 kompensiert werden. Die verbleibende Differenz der Risiken von 38'095 CHF und die daraus folgende Wahl der Variante 3 als optimale Variante muss aufgrund dessen, dass die getroffenen Annahmen in der Parameterauswahl 4 nicht unbedingt der Wirklichkeit entsprechen, von einem kritischen Standpunkt aus betrachtet werden.

Meiner Meinung nach entspricht die getroffene Annahme, dass die Wartezeit der Variante 3 aufgrund der Einführung eines Ampelsystems nicht ansteigt, nicht der Realität.

So wird bei der Betrachtung der jetzigen Situation am Bahnübergang klar, dass sich die Wartezeit aufgrund von Rückstaus, bedingt durch die Verkehrsüberlastung der Innenstadt, zu Hauptverkehrszeiten deutlich verlängert. Infolge wird die Einführung eines Ampelsystems aufgrund der beengten Platzverhältnisse vor Ort zu, wie für den Grundzustand sowie für die Parameterauswahlen 1, 2 und 3 angenommen, einer erhöhten Wartezeit führen, was den Annahmen der Parameterauswahl 4 widerspricht.

Die Wahl der Variante 3 zur optimalen Variante für die Parameterauswahl 4 hat auf den Entscheidungsprozess keine Einfluss. Nimmt man an, dass sich die Wartezeiten für alle 3 Varianten, aufgrund der Einführung einer neuen S-Bahn Linie gleichmässig erhöht, so lohnt sich das grössere Investment der Variante 3 nur bei einer Betrachtung der Situation über einen Zeitraum von vierzig Jahren.

Die Variante 3 könnte sich für die Stadt Uster lohnen, da das eingeführte Ampelsystem eine Verschiebung des innerstädtischen Modalsplit zur Folge haben kann und dadurch der Veloverkehr gefördert wird, was sich wiederum in den Unfall- und Umweltbelastungskosten wiederspiegelt.

In dieser Diskussion werden die Mehrwerte der Variante 3, die aufgrund der erhöhten Sicherheit sowie des erhöhten Fahrkomfort entstehen, ausser Acht gelassen. Die Velounterführung der Variante 2 mit ihren 1.5 Meter lichten Breite hat im Vergleich zur Variante 3 mit über 2 Metern Durchfahrtsbreite, einen deutlich geringeren Fahrkomfort und dementsprechend auch ein erhöhtes Unfallrisiko. Somit kann für die Parameterauswahl 4, mit den mir zur Verfügung stehenden Mitteln nicht abschliessend geklärt werden, ob Variante 3 die optimale Variante ist.

7 Schlussfolgerung und Ausblick

Basierend auf den in Kapitel 5 dargestellten Resultaten und der in Kapitel 6 durchgeföhrten Diskussion, ist die Variante 2 die optimale Verbesserung der Verkehrssituation in Uster.

Unter den in Abschnitt 4.2 getroffenen Annahmen und der unter Abschnitt 4.4.1 modellierten Veränderungen des Mobilitätsbedarfes, ergibt sich, dass sich die Mehrkosten durch den Bau der Variante 2 gegenüber Variante 1 bei einer Betrachtung der Gesamtkosten über den Zeitraum von 40 Jahren, lohnen würden. Insbesondere unter der in Kapitel 6 durchgeföhrten, Betrachtung der Reisezeitkosten ergibt sich eine eindeutige Lösung zur Optimierung des Bahnübergangs Brunnenstrasse. Die Variante 2 ist nicht nur in ökologischer Hinsicht der Variante 1 überlegen, sondern auch im ökonomischen Sinne.

Die höheren Investitions- und Wartungskosten der Variante 2 rechnen sich demnach im Vergleich zur Variante 1, bei einer Betrachtung der Situation über 40 Jahre. Die Variante 3, die weitaus höhere Investitionskosten verursachen würde, lohnt sich, nach der in Kapitel 5 und Kapitel 6 durchgeföhrten Diskussion der Risiken, aufgrund der höheren Reisezeitkosten, die infolge der verlängerten Wartezeit entstehen, nicht.

Ausser in der vierten Parameterauswahl der Sensitivitätsanalyse, in der die zu erwartende Reisezeit verändert wird, kann die Variante 3, aufgrund der höheren Gesamtkosten, als optimale Variante ausgeschlossen werden. Somit lohnen sich die Mehrkosten der Variante 3 nicht.

Anzumerken ist, dass sich die Ergebnisse bei der Berücksichtigung weiterer Interessengruppen sowie einer komplexeren Modellierung der Einflussfaktoren auf das DTV, verändern könnten. Aufgrund der begrenzten Möglichkeiten, die mir im Rahmen dieser Projektarbeit zur Beurteilung der Situation zur Verfügung standen, konnte ich nicht alle relevanten Faktoren in der Entscheidungsfindung berücksichtigen. Das sollte im Rahmen einer erweiterten Studie zur Situation am Bahnübergang Brunnenstrasse erfolgen.

Um die Situation am Bahnübergang vollständig abzubilden, müssen die Fussgänger und der ÖV miteinbezogen werden. Insbesondere der ÖV hat grosses Interesse an der zukünftigen Entwicklung des Bahnübergangs, da alle Busse, um die Gleisanlage zu queren, den Bahnübergang Brunnenstrasse nutzen. Zusätzlich müsste, um die effektive Verkehrssituation vor Ort in den Entscheidungsprozess miteinzubeziehen, eine Verkehrssimulation durchgeführt werden. So könnte im Fall der Variante 3 die entstehende Wartezeit aufgrund des Ampelsystems exakter bestimmt werden sowie könnten die Variante auf ihre Gebrauchstauglichkeit untersucht werden.

Zu Beginn des von mir durchgeföhrten Problemlösungsprozesses, habe ich zur Vereinfachung die beteiligten Personen auf die in Abschnitt 4.1.1 definierten Interessensgruppen reduziert, um im gegebenen Zeitrahmen eine ansprechende Lösung erarbeiten zu können. Eine Aufteilung der Kosten nach den verschiedenen Interessensverbänden wäre im Rahmen

7 Schlussfolgerung und Ausblick

der Diskussion sehr aufschlussreich gewesen. Da die die Situation und die Möglichkeiten die mir für die Modellierung zur Verfügung standen zur Folge haben, dass die Reisezeitkosten den gesamten Risikovergleich der Varianten bestimmten, habe ich im Rahmen der Diskussion der Ergebnisse auf diese Unterteilung verzichtet. Es wäre jedoch sehr interessant, im Rahmen der weiteren Prüfung der Varianten, eine vertieftere Beurteilung der Nutzer- und Besitzerkosten durchzuführen.

Hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung der Mobilität wird das Fahrrad voraussichtlich auch auf Strecken bis zu 30km eine entscheidende Rolle bei der Verkehrsmittelwahl spielen. Aufgrund dessen und in Anbetracht der Bestrebungen der Stadt Uster, ein Zentrum von regionaler Bedeutung zu werden, ist die Förderung des ökologischen und zukunftsorientierten Langsamverkehrs unerlässlich und insbesondere im Rahmen einer nachhaltigen Stadtentwicklung voranzutreiben.

So wäre eine Erweiterung der geplanten Veloinfrastruktur entlang der Pfäffikerstrasse bis zum Spital sowie entlang der Bahnhofstrasse bis zum Sternenplatz im Rahmen einer vertieften Untersuchung zu berücksichtigen. Eine mögliche Variante einer solchen Veloschnellroute könnte anhand des Beispiels der Radschnellwege von Kopenhagen erstellt werden, die sich in Dänemark bereits bewährt und das Pendeln mit dem Velo leichter und sicherer gemacht haben.

Insbesondere unter Anbetracht der aktuellen Situation mit CoVid-19, in der das Velo eine Renaissance erlebt, muss der Ausbau und die Förderung der innerstädtischen Langsamverkehrsnetze vorangetrieben werden.

Nichtsdestotrotz ist, um eine nachhaltige Verbesserung der Verkehrslage in Uster zu erreichen, eine Berücksichtigung der weiteren Schwachstellen des Ustemer Verkehrsnetzes unerlässlich. Insbesondere die zukünftige Entwicklung des Nüsslikreisel sowie der Zürichstrasse haben einen grossen Einfluss auf die Stadtentwicklung. Hinzu kommt, dass die Optimierung eines Teilstücks einer bestehenden Infrastruktur nur dann erfolgen sollte, wenn die Einflüsse auf die umliegenden Systeme berücksichtigt werden. So muss, um Uster nachhaltig zu verbessern, nicht nur das Velonetz ausgebaut sondern das gesamte Verkehrskonzept der Stadt überarbeitet werden.

Ausblick Die von mir vorgeschlagenen Schritte, die Uster in der nächsten Zeit tätigen soll, sind in der nachfolgenden Abbildung 7.1 dargestellt.

So ergibt sich einerseits, wie ausführlich besprochen, der Weg, die Variante 2 in Betracht zu ziehen und die weiteren Schritte dementsprechend einzuleiten, wie zum Beispiel der Beginn einer Detailstudie oder aber bereits der Start des Planungsprozesses. Der zweite Weg der sich der Stadt Uster anbietet, ist eine Hauptstudie, wodurch infolge der ausführlichen Prüfung der Situation, entweder die Wahl der optimalen Variante bestätigt oder aber eine andere Variante als optimal bestimmt wird. Die letzte Möglichkeit, die sich der Stadt Uster bietet, ist die Option: Variante 1 - "nichts zu machen", wobei für relativ wenig Geld die Verkehrssicherheit marginal erhöht jedoch über einen Zeitraum von vierzig Jahren hohe Mehrkosten generiert wird.

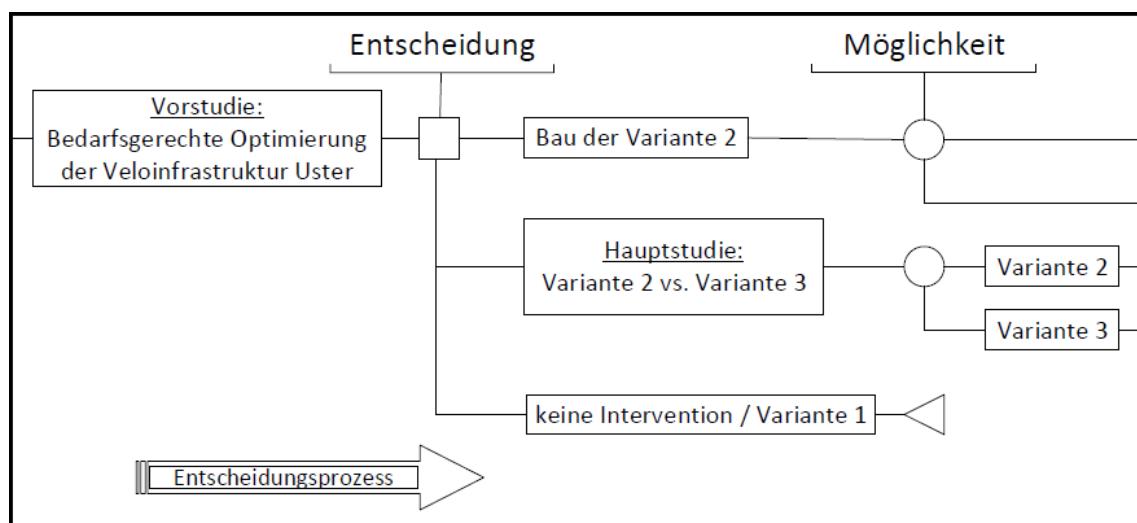


Abbildung 7.1: Möglicher Entscheidungsprozess der Stadt Uster für die nähere Zukunft

Literaturverzeichnis

- Adey, B. T., T. Herrmann, K. Tsafatinos, J. Lüking, N. Schindeler und R. Hajdin. 2012. „Methodology and base cost models to determine the total benefits of preservation interventions on road sections in Switzerland“. *Structure and Infrastructure Engineering* 8 (7): 639–654. doi:10.1080/15732479.2010.491119. eprint: <https://doi.org/10.1080/15732479.2010.491119>. <https://doi.org/10.1080/15732479.2010.491119>.
- Adey, Bryan T., Marcel Burkhalter und Claudio Martani. 2019. „Defining road service to facilitate road infrastructure asset management“. *Infrastructure Asset Management*, Nr. 0: 1–16. doi:10.1680/jinam.18.00045. eprint: <https://doi.org/10.1680/jinam.18.00045>. <https://doi.org/10.1680/jinam.18.00045>.
- Adey et al. 2019. „Unterrichtsmaterial Systems Engineering“.
- BFS und ASTRA. 2019. „Strassenfahrzeugbestand (MFZ)“. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/verkehrsinfrastruktur-fahrzeuge/fahrzeuge/strassenfahrzeuge-bestand-motorisierungsgrad.html>.
- Bundesamt für Raumentwicklung. 2004. „Externe Lärmkosten des Strassen- und Schienenverkehrs der Schweiz, Aktualisierung für das Jahr 2000, Bern“.
- . 2016. „Verkehrsperspektiven 2040“. *Entwicklung des Personen- und Güterverkehrs in der Schweiz*.
- Bundesamt für Statistik (BFS). 2017. „Verkehrsverhalten der Bevölkerung“. *Ergebnisse des Mikrozensus Mobilität und Verkehr 2015*.
- . 2019. „Leistungen des privaten Personenverkehrs auf der Strasse“. *Methodenbericht 2019*. <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/aktuell/neue-veroeffentlichungen.assetdetail.9867227.html>.
- Bundesamt für Strassen ASTRA. 2020. *Strassenverkehrsunfall-Statistik 2010 - 2019*. Technischer Bericht.
- Ecoplan, VSS. 2007. „Externe Kosten im Strassenverkehr“. *Grundlagen für die Durchführung einer Kosten-Nutzen-Analyse*. <https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/ivt-dam/vpl/vss-ek/2005-204.pdf>.
- Esders, Miriam, Nicola Morte und Bryan Adey. 2015. „A Methodology to Ensure the Consideration of Flexibility and Robustness in the Selection of Facility Renewal Projects“. *International Journal of Architecture, Engineering and Construction* 4 (September). doi:10.7492/ICSDM.2015.013.
- Geschäftsfeld Stadtraum und Natur. 2019. *Stadtentwicklungskonzept STEK*. Stadt Uster. <https://www.uster.ch/publikationen/229951>.

- Kanton Zürich. 2019a. „GIS-Browser Kanton Zürich“. <https://maps.zh.ch/>.
- . 2019b. „Strassenverkehrszählung Uster (ZH0787), Seefeldstrasse (Route Nr. 744 (787)“. *Daten*. <https://maps.zh.ch/system/docs/verkzaehlstellen/1119.pdf>.
- . 2019c. „Veloverkehrszählung Uster (ZH1119), Radweg, (1119 Uster) Alltagsroute (05 038)“. *Jahresreport*. <https://maps.zh.ch/system/docs/verkzaehlstellen/787.pdf>.
- Kontextplan AG, Chrisina Farner, Markus Hofstetter. 2010. *Baukosten der häufigsten Langsamverkehrsinfrastrukturen*. Hrsg. Bundesamt für Strassen (ASTRA).
- NACTO. 2018. „Bike Lane Capacity“. <https://streets-alive-yarra.org/bicycle-lane-capacity/>.
- Neufville, Richard de, und Stefan Scholtes. 2011. *Flexibility in Engineering Design*. Januar. ISBN: 9780262303569. doi:10.7551/mitpress/8292.001.0001.

Glossar

Begriff	Definition
STEK	Stadtentwicklungskonzept
DTV	Tägliches Verkehrsaufkommen
MIV	Motorisierter Individualverkehr
ÖV	Öffentlicher Verkehr

Anhang

A.1 DTV Modellierung

A.2 Kostenberechnung der Varianten

DTV-Werte: SB1/SU1-3					
Szenario: SB1/SU1		Szenario: SB1/SU2		Szenario: SB1/SU3	
	DTV_{MIV}	DTV_{Velo}	DTV_{MIV}	DTV_{Velo}	DTV_{MIV}
2015	11963	1246	11963	1255	11963
2016	12023	1252	12023	1261	12023
2017	12083	1258	12083	1267	12083
2018	12143	1264	12143	1273	12143
2019	12203	1271	12203	1280	12203
2020	12263	1277	12263	1286	12263
2021	12324	1283	12324	1292	12324
2022	12384	1289	12384	1298	12384
2023	12444	1295	12444	1304	12444
2024	12504	1302	12504	1311	12504
2025	12564	1308	12564	1317	12564
2026	12624	1314	12624	1323	12624
2027	12684	1320	12684	1329	12684
2028	12744	1327	12744	1336	12744
2029	12804	1333	12804	1342	12804
2030	12865	1339	12865	1348	12865
2031	12925	1345	12925	1354	12925
2032	12985	1351	12985	1360	12985
2033	13045	1358	13045	1367	13045
2034	13105	1364	13105	1373	13105
2035	13165	1370	13165	1379	13165
2036	13225	1376	13225	1385	13225
2037	13285	1383	13285	1392	13285
2038	13346	1389	13346	1398	13346
2039	13406	1395	13406	1404	13406
2040	13466	1401	13466	1410	13466
2041	13526	1407	13526	1416	13526
2042	13586	1414	13586	1423	13586
2043	13646	1420	13646	1429	13646
2044	13706	1426	13706	1435	13706
2045	13766	1432	13766	1441	13766
2046	13826	1439	13826	1448	13826
2047	13887	1445	13887	1454	13887
2048	13947	1451	13947	1460	13947
2049	14007	1457	14007	1466	14007
2050	14067	1463	14067	1472	14067
2051	14127	1470	14127	1479	14127
2052	14187	1476	14187	1485	14187
2053	14247	1482	14247	1491	14247
2054	14307	1488	14307	1497	14307
2055	14367	1495	14367	1504	14367
2056	14428	1501	14428	1510	14428
2057	14488	1507	14488	1516	14488
2058	14548	1513	14548	1522	14548
2059	14608	1520	14608	1529	14608
2060	14668	1526	14668	1535	14668

Abbildung A.1: Berechnung des DTV SB1/SU1-3

Anhang

DTV-Werte: SB2/SU1-3						
	Szenario: SB2/SU1		Szenario: SB2/SU2		Szenario: SB2/SU3	
	<i>DTV_{MIV}</i>	<i>DTV_{Velo}</i>	<i>DTV_{MIV}</i>	<i>DTV_{Velo}</i>	<i>DTV_{MIV}</i>	<i>DTV_{Velo}</i>
2015	11903	1239	11903	1248	11903	1257
2016	12023	1252	12023	1261	12023	1270
2017	12143	1264	12143	1273	12143	1282
2018	12263	1277	12263	1286	12263	1295
2019	12384	1289	12384	1298	12384	1307
2020	12504	1302	12504	1311	12504	1320
2021	12624	1314	12624	1323	12624	1332
2022	12744	1327	12744	1336	12744	1345
2023	12865	1339	12865	1348	12865	1357
2024	12985	1351	12985	1360	12985	1369
2025	13105	1364	13105	1373	13105	1382
2026	13225	1376	13225	1385	13225	1394
2027	13346	1389	13346	1398	13346	1407
2028	13466	1401	13466	1410	13466	1419
2029	13586	1414	13586	1423	13586	1432
2030	13706	1426	13706	1435	13706	1444
2031	13826	1439	13826	1448	13826	1457
2032	13947	1451	13947	1460	13947	1469
2033	14067	1463	14067	1472	14067	1481
2034	14187	1476	14187	1485	14187	1494
2035	14307	1488	14307	1497	14307	1506
2036	14428	1501	14428	1510	14428	1519
2037	14548	1513	14548	1522	14548	1531
2038	14668	1526	14668	1535	14668	1544
2039	14788	1538	14788	1547	14788	1556
2040	14909	1551	14909	1560	14909	1569
2041	15029	1563	15029	1572	15029	1581
2042	15149	1576	15149	1585	15149	1594
2043	15269	1588	15269	1597	15269	1606
2044	15389	1600	15389	1609	15389	1618
2045	15510	1613	15510	1622	15510	1631
2046	15630	1625	15630	1634	15630	1643
2047	15750	1638	15750	1647	15750	1656
2048	15870	1650	15870	1659	15870	1668
2049	15991	1663	15991	1672	15991	1681
2050	16111	1675	16111	1684	16111	1693
2051	16231	1688	16231	1697	16231	1706
2052	16351	1700	16351	1709	16351	1718
2053	16472	1712	16472	1721	16472	1730
2054	16592	1725	16592	1734	16592	1743
2055	16712	1737	16712	1746	16712	1755
2056	16832	1750	16832	1759	16832	1768
2057	16952	1762	16952	1771	16952	1780
2058	17073	1775	17073	1784	17073	1793
2059	17193	1787	17193	1796	17193	1805
2060	17313	1800	17313	1809	17313	1818

Abbildung A.2: Berechnung des DTV SB2/SU1-3

DTV-Werte: SB3/SU1-3					
Szenario: SB3/SU1		Szenario: SB3/SU2		Szenario: SB3/SU3	
	DTV _{MIV}	DTV _{Velo}	DTV _{MIV}	DTV _{Velo}	DTV _{MIV}
2015	11843	1233	11843	1242	11843
2016	12023	1252	12023	1261	12023
2017	12203	1271	12203	1280	12203
2018	12384	1289	12384	1298	12384
2019	12564	1308	12564	1317	12564
2020	12744	1327	12744	1336	12744
2021	12925	1345	12925	1354	12925
2022	13105	1364	13105	1373	13105
2023	13285	1383	13285	1392	13285
2024	13466	1401	13466	1410	13466
2025	13646	1420	13646	1429	13646
2026	13826	1439	13826	1448	13826
2027	14007	1457	14007	1466	14007
2028	14187	1476	14187	1485	14187
2029	14367	1495	14367	1504	14367
2030	14548	1513	14548	1522	14548
2031	14728	1532	14728	1541	14728
2032	14909	1551	14909	1560	14909
2033	15089	1569	15089	1578	15089
2034	15269	1588	15269	1597	15269
2035	15450	1607	15450	1616	15450
2036	15630	1625	15630	1634	15630
2037	15810	1644	15810	1653	15810
2038	15991	1663	15991	1672	15991
2039	16171	1681	16171	1690	16171
2040	16351	1700	16351	1709	16351
2041	16532	1719	16532	1728	16532
2042	16712	1737	16712	1746	16712
2043	16892	1756	16892	1765	16892
2044	17073	1775	17073	1784	17073
2045	17253	1793	17253	1802	17253
2046	17433	1812	17433	1821	17433
2047	17614	1831	17614	1840	17614
2048	17794	1849	17794	1858	17794
2049	17974	1868	17974	1877	17974
2050	18155	1887	18155	1896	18155
2051	18335	1905	18335	1914	18335
2052	18515	1924	18515	1933	18515
2053	18696	1943	18696	1952	18696
2054	18876	1961	18876	1970	18876
2055	19056	1980	19056	1989	19056
2056	19237	1999	19237	2008	19237
2057	19417	2017	19417	2026	19417
2058	19597	2036	19597	2045	19597
2059	19778	2055	19778	2064	19778
2060	19958	2073	19958	2082	19958

Abbildung A.3: Berechnung des DTV SB3/SU1-3

Anhang

Wartezeit: τ Fahrzeug		Kosten pro Jahr: Variante 1 - SB1/SU1						
		Unterhaltskosten	Reisezeitkosten	Betriebskosten	Umweltkosten	Unfallkosten	Totale Kosten pro Jahr	
t_{MIV} [h]	t_{Velo} [h]	K_U	K_T	K_B	K_U	K_A		
2019	0.08549605	0.088666667	4000	12813432	255001	17527	8.17E+03	13098135
2020	0.08549606	0.088666667	72000	12876532	256257	17257	8.22E+03	13230261
2021	0.08549607	0.088666667	4000	12939632	257513	16984	8.26E+03	13226384
2022	0.08549608	0.088666667	4000	13002732	258769	16707	8.30E+03	13290503
2023	0.08549610	0.088666667	4000	13065832	260025	16426	8.34E+03	13354619
2024	0.08549611	0.088666667	4000	13128932	261281	16143	8.38E+03	13418731
2025	0.08549612	0.088666667	4000	13192032	262537	15855	8.42E+03	13482840
2026	0.08549613	0.088666667	4000	13255132	263793	15564	8.46E+03	13546946
2027	0.08549614	0.088666667	4000	13318232	265049	15270	8.50E+03	13611048
2028	0.08549616	0.088666667	4000	13381332	266305	14972	8.54E+03	13675147
2029	0.08549617	0.088666667	4000	13444433	267561	14671	8.58E+03	13739242
2030	0.08549618	0.088666667	4000	13507533	268817	14366	8.62E+03	13803334
2031	0.08549619	0.088666667	4000	13570633	270073	14058	8.66E+03	13867422
2032	0.08549621	0.088666667	4000	13633734	271329	13746	8.70E+03	13931507
2033	0.08549622	0.088666667	4000	13696834	272585	13431	8.74E+03	13995588
2034	0.08549623	0.088666667	4000	13759935	273842	13112	8.78E+03	14059666
2035	0.08549625	0.088666667	4000	13823035	275098	12790	8.82E+03	14123741
2036	0.08549626	0.088666667	4000	13886136	276354	12464	8.86E+03	14187812
2037	0.08549628	0.088666667	4000	13949237	277610	12135	8.90E+03	14251879
2038	0.08549629	0.088666667	4000	14012337	278866	11802	8.94E+03	14315944
2039	0.08549630	0.088666667	4000	14075438	280122	11466	8.98E+03	14380004
2040	0.08549632	0.088666667	4000	14138539	281378	11126	9.02E+03	14444062
2041	0.08549633	0.088666667	4000	14201640	282634	10783	9.06E+03	14508115
2042	0.08549635	0.088666667	4000	14264741	283890	10437	9.10E+03	14572166
2043	0.08549636	0.088666667	4000	14327842	285146	10086	9.14E+03	14636213
2044	0.08549638	0.088666667	4000	14390943	286402	9733	9.18E+03	14700256
2045	0.08549639	0.088666667	4000	14454044	287658	9376	9.22E+03	14764296
2046	0.08549641	0.088666667	4000	14517145	288914	9015	9.26E+03	14828333
2047	0.08549643	0.088666667	4000	14580246	290170	8651	9.30E+03	14892366
2048	0.08549644	0.088666667	4000	14643347	291426	8283	9.34E+03	14956396
2049	0.08549646	0.088666667	4000	14706448	292682	7912	9.38E+03	15020422
2050	0.08549648	0.088666667	4000	14769550	293938	7537	9.42E+03	15084445
2051	0.08549649	0.088666667	4000	14832651	295194	7159	9.46E+03	15148465
2052	0.08549651	0.088666667	4000	14895753	296450	6778	9.50E+03	15212481
2053	0.08549653	0.088666667	4000	14958854	297706	6393	9.54E+03	15276493
2054	0.08549654	0.088666667	4000	15021956	298962	6225	9.58E+03	15340724
2055	0.08549656	0.088666667	4000	15085057	300218	6251	9.62E+03	15405148
2056	0.08549658	0.088666667	4000	15148159	301474	6277	9.66E+03	15469572
2057	0.08549660	0.088666667	4000	15211261	302730	6303	9.70E+03	15533996
2058	0.08549662	0.088666667	4000	15274363	303986	6329	9.74E+03	15598420
2059	0.08549664	0.088666667	4000	15337465	305242	6356	9.78E+03	15662844
2060	0.08549665	0.088666667	4000	15400567	306498	6382	9.82E+03	15727268
Summe:		252000	6.4312E+08	12798927	543544	4.10E+05	6.57121E+08	657121111

Abbildung A.4: Kostenberechnung Variante 1 - SB1/SU1

A.2 Kostenberechnung der Varianten

Wartezeit: $\frac{t}{Fahrzeug}$		Kosten pro Jahr: Variante 1 - SB1/SU2					
		Unterhaltskosten	Reisezeitkosten	Betriebskosten	Umweltkosten	Unfallkosten	Totale Kosten pro Jahr
		K_U	K_{TT}	K_B	K_U	K_A	
2019	0.08549605	0.088666667	4000	12819170	255041	17527	8.20E+03
2020	0.08549606	0.088666667	72000	12882270	256297	17257	8.24E+03
2021	0.08549607	0.088666667	4000	12945370	257553	16984	8.28E+03
2022	0.08549609	0.088666667	4000	13008470	258809	16707	8.32E+03
2023	0.08549610	0.088666667	4000	13071570	260065	16426	8.36E+03
2024	0.08549611	0.088666667	4000	13134670	261321	16143	8.40E+03
2025	0.08549612	0.088666667	4000	13197770	262577	15855	8.44E+03
2026	0.08549613	0.088666667	4000	13260870	263833	15564	8.48E+03
2027	0.08549614	0.088666667	4000	13323970	265089	15270	8.52E+03
2028	0.08549615	0.088666667	4000	13387070	266345	14972	8.56E+03
2029	0.08549617	0.088666667	4000	13450171	267601	14671	8.60E+03
2030	0.08549618	0.088666667	4000	13513271	268857	14366	8.64E+03
2031	0.08549619	0.088666667	4000	13576371	270113	14058	8.68E+03
2032	0.08549621	0.088666667	4000	13639472	271369	13746	8.72E+03
2033	0.08549622	0.088666667	4000	13702572	272625	13431	8.76E+03
2034	0.08549623	0.088666667	4000	13765673	273881	13112	8.80E+03
2035	0.08549625	0.088666667	4000	13828773	275137	12790	8.84E+03
2036	0.08549626	0.088666667	4000	13891874	276393	12464	8.88E+03
2037	0.08549628	0.088666667	4000	13954975	277649	12135	8.92E+03
2038	0.08549629	0.088666667	4000	14018075	278905	11802	8.96E+03
2039	0.08549630	0.088666667	4000	14081176	280161	11466	9.00E+03
2040	0.08549632	0.088666667	4000	14144277	281417	11126	9.04E+03
2041	0.08549633	0.088666667	4000	14207378	282673	10783	9.08E+03
2042	0.08549635	0.088666667	4000	14270479	283929	10437	9.12E+03
2043	0.08549636	0.088666667	4000	14333580	285185	10086	9.16E+03
2044	0.08549638	0.088666667	4000	14396681	286441	9733	9.20E+03
2045	0.08549639	0.088666667	4000	14459782	287697	9376	9.24E+03
2046	0.08549641	0.088666667	4000	14522883	288953	9015	9.28E+03
2047	0.08549643	0.088666667	4000	14585984	290209	8651	9.32E+03
2048	0.08549644	0.088666667	4000	14649085	291465	8283	9.36E+03
2049	0.08549646	0.088666667	4000	14712186	292721	7912	9.40E+03
2050	0.08549648	0.088666667	4000	14775288	293977	7537	9.44E+03
2051	0.08549649	0.088666667	4000	14838389	295233	7159	9.49E+03
2052	0.08549651	0.088666667	4000	14901491	296489	6778	9.53E+03
2053	0.08549653	0.088666667	4000	14964592	297745	6393	9.57E+03
2054	0.08549654	0.088666667	4000	15027694	299001	6225	9.61E+03
2055	0.08549656	0.088666667	4000	15090795	300257	6251	9.65E+03
2056	0.08549658	0.088666667	4000	15153897	301513	6277	9.69E+03
2057	0.08549660	0.088666667	4000	15216999	302769	6303	9.73E+03
2058	0.08549662	0.088666667	4000	15280101	304025	6329	9.77E+03
2059	0.08549664	0.088666667	4000	15343203	305281	6356	9.81E+03
2060	0.08549665	0.088666667	4000	15406305	306537	6382	9.85E+03
Summe:		252000	6.4338E+08	1280741	543544	4.11E+05	657388001

Abbildung A.5: Kostenberechnung Variante 1 - SB1/SU2

Anhang

Wartezeit: τ Fahrzeug		Kosten pro Jahr: Variante 1 - SB1/SU3						
		Unterhaltskosten K_U	Reisezeitkosten K_T	Betriebskosten K_B	Umweltkosten K_U	Unfallkosten K_A	Totalen Kosten pro Jahr	
2019	0.08549605	0.088666667	4000	12824908	255080	17527	8.22E+03	13109739
2020	0.08549606	0.088666667	72000	12888008	256336	17257	8.26E+03	13241865
2021	0.08549607	0.088666667	4000	12951108	257592	16984	8.30E+03	13237988
2022	0.08549608	0.088666667	4000	13014208	258848	16707	8.34E+03	13202107
2023	0.08549610	0.088666667	4000	13077308	260104	16426	8.38E+03	13266223
2024	0.08549611	0.088666667	4000	13140408	261360	16143	8.42E+03	13430335
2025	0.08549612	0.088666667	4000	13203508	262616	15855	8.47E+03	13494444
2026	0.08549613	0.088666667	4000	13266608	263872	15564	8.51E+03	13558550
2027	0.08549614	0.088666667	4000	13329708	265128	15270	8.55E+03	13622652
2028	0.08549616	0.088666667	4000	13392808	266384	14972	8.59E+03	13686751
2029	0.08549617	0.088666667	4000	13455909	267640	14671	8.63E+03	13750846
2030	0.08549618	0.088666667	4000	13519009	268896	14366	8.67E+03	13814938
2031	0.08549619	0.088666667	4000	13582109	270152	14058	8.71E+03	13879026
2032	0.08549621	0.088666667	4000	13645210	271408	13746	8.75E+03	13943111
2033	0.08549622	0.088666667	4000	13708310	272664	13431	8.79E+03	14007192
2034	0.08549623	0.088666667	4000	13771411	273920	13112	8.83E+03	14071270
2035	0.08549625	0.088666667	4000	13834511	275176	12790	8.87E+03	14135345
2036	0.08549626	0.088666667	4000	13897612	276432	12464	8.91E+03	14199416
2037	0.08549628	0.088666667	4000	13960713	277688	12135	8.95E+03	14263483
2038	0.08549629	0.088666667	4000	14023813	278944	11802	8.99E+03	14327547
2039	0.08549630	0.088666667	4000	14086914	280200	11466	9.03E+03	14391608
2040	0.08549632	0.088666667	4000	14150015	281456	11126	9.07E+03	14455665
2041	0.08549633	0.088666667	4000	14213116	282712	10783	9.11E+03	14519719
2042	0.08549635	0.088666667	4000	14276217	283968	10437	9.15E+03	14583770
2043	0.08549636	0.088666667	4000	14339318	285224	10086	9.19E+03	14647817
2044	0.08549638	0.088666667	4000	14402419	286480	9733	9.23E+03	14711860
2045	0.08549639	0.088666667	4000	14465520	287736	9376	9.27E+03	14775900
2046	0.08549641	0.088666667	4000	14528621	288993	9015	9.31E+03	14839937
2047	0.08549643	0.088666667	4000	14591722	290249	8651	9.35E+03	14903970
2048	0.08549644	0.088666667	4000	14654823	291505	8283	9.39E+03	14968000
2049	0.08549646	0.088666667	4000	14717925	292761	7912	9.43E+03	15032026
2050	0.08549648	0.088666667	4000	14781026	294017	7537	9.47E+03	15096049
2051	0.08549649	0.088666667	4000	14844127	295273	7159	9.51E+03	15160069
2052	0.08549651	0.088666667	4000	14907229	296529	6778	9.55E+03	15224085
2053	0.08549653	0.088666667	4000	14970330	297785	6393	9.59E+03	15288097
2054	0.08549654	0.088666667	4000	15033432	299041	6225	9.63E+03	15352327
2055	0.08549656	0.088666667	4000	15096533	300297	6251	9.67E+03	15416751
2056	0.08549658	0.088666667	4000	15159635	301553	6277	9.71E+03	15481176
2057	0.08549660	0.088666667	4000	15222737	302809	6303	9.75E+03	15545600
2058	0.08549662	0.088666667	4000	15285839	304065	6329	9.79E+03	15610024
2059	0.08549664	0.088666667	4000	15348941	305321	6356	9.83E+03	15674448
2060	0.08549665	0.088666667	4000	15412043	306577	6382	9.87E+03	15738872
Summe:		252000	6.4364E+08	12802554	543544	4.12E+05	6.57655E+08	657654890

Abbildung A.6: Kostenberechnung Variante 1 - SB1/SU3

A.2 Kostenberechnung der Varianten

Wartezeit: $\frac{t}{Fahrzeug}$		Kosten pro Jahr: Variante 1 - SB2/SU1						
		Unterhaltskosten	Reisezeitkosten	Betriebskosten	Umweltkosten	Unfallkosten	Totale Kosten pro Jahr	
		K_U	K_{TT}	K_B	K_U	K_A		
2019	0.08549608	0.088666667	4000	13002732	258769	17786	8.30E+03	13291582
2020	0.08549611	0.088666667	72000	13128932	261281	17595	8.38E+03	13488184
2021	0.08549613	0.088666667	4000	13255132	263793	17398	8.46E+03	13548779
2022	0.08549616	0.088666667	4000	13381332	266305	17193	8.54E+03	13677368
2023	0.08549618	0.088666667	4000	13507533	268817	16982	8.62E+03	13805949
2024	0.08549621	0.088666667	4000	13633734	271329	16763	8.70E+03	13934524
2025	0.08549623	0.088666667	4000	13759935	273842	16538	8.78E+03	14063092
2026	0.08549626	0.088666667	4000	13886136	276354	16306	8.86E+03	14191653
2027	0.08549629	0.088666667	4000	14012337	278866	16066	8.94E+03	14320207
2028	0.08549632	0.088666667	4000	14138539	281378	15820	9.02E+03	14448755
2029	0.08549635	0.088666667	4000	14264741	283890	15566	9.10E+03	14577296
2030	0.08549638	0.088666667	4000	14390943	286402	15306	9.18E+03	14705830
2031	0.08549641	0.088666667	4000	14517145	288914	15039	9.26E+03	14834357
2032	0.08549644	0.088666667	4000	14643347	291426	14764	9.34E+03	14962877
2033	0.08549648	0.088666667	4000	14769550	293938	14483	9.42E+03	15091391
2034	0.08549651	0.088666667	4000	14895753	296450	14195	9.50E+03	15219898
2035	0.08549654	0.088666667	4000	15021956	298962	13900	9.58E+03	15348398
2036	0.08549658	0.088666667	4000	15148159	301474	13597	9.66E+03	15476892
2037	0.08549662	0.088666667	4000	15274363	303986	13288	9.74E+03	15605379
2038	0.08549665	0.088666667	4000	15400967	306498	12972	9.82E+03	15733859
2039	0.08549669	0.088666667	4000	15526771	309010	12649	9.90E+03	15862332
2040	0.08549673	0.088666667	4000	15652975	311522	12319	9.98E+03	15990798
2041	0.08549677	0.088666667	4000	15779180	314034	11981	1.01E+04	16119258
2042	0.08549681	0.088666667	4000	15905385	316546	11637	1.01E+04	16247711
2043	0.08549686	0.088666667	4000	16031590	319058	11286	1.02E+04	16376158
2044	0.08549690	0.088666667	4000	16157795	321570	10928	1.03E+04	16504598
2045	0.08549694	0.088666667	4000	16284001	324082	10563	1.04E+04	16633031
2046	0.08549699	0.088666667	4000	16410207	326594	10191	1.05E+04	16761457
2047	0.08549704	0.088666667	4000	16536414	329106	9812	1.05E+04	16889877
2048	0.08549708	0.088666667	4000	16662621	331618	9426	1.06E+04	17018290
2049	0.08549713	0.088666667	4000	16788828	334130	9033	1.07E+04	17146697
2050	0.08549718	0.088666667	4000	16915035	336642	8632	1.08E+04	17275096
2051	0.08549723	0.088666667	4000	17041243	339154	8225	1.09E+04	17403490
2052	0.08549727	0.088666667	4000	17167451	341666	7811	1.09E+04	17531876
2053	0.08549734	0.088666667	4000	17293660	344178	7391	1.10E+04	17660256
2054	0.08549739	0.088666667	4000	17419869	346690	7219	1.11E+04	17788885
2055	0.08549745	0.088666667	4000	17546078	349202	7271	1.12E+04	17917739
2056	0.08549750	0.088666667	4000	17672288	351714	7323	1.13E+04	18046594
2057	0.08549756	0.088666667	4000	17798498	354226	7376	1.13E+04	18175449
2058	0.08549762	0.088666667	4000	17924708	356738	7428	1.14E+04	18304304
2059	0.08549768	0.088666667	4000	18050919	359250	7480	1.15E+04	18433159
2060	0.08549774	0.088666667	4000	18177130	361762	7533	1.16E+04	18562015
Summe:		252000	7.0552E+08	14041124	584649	4.50E+05	7.20852E+08	

Abbildung A.7: Kostenberechnung Variante 1 - SB2/SU1

Anhang

Wartezeit: τ Fahrzeug		Kosten pro Jahr: Variante 1 - SB2/SU2						
		Unterhaltskosten	Reisezeitkosten	Betriebskosten	Umweltkosten	Unfallkosten	Totalen Kosten pro Jahr	
t_{MIV} [h]	t_{Velo} [h]	K_U	K_T	K_B	K_U	K_A		
2019	0.08549608	0.088666667	4000	13008470	258809	17786	8.32E+03	13297384
2020	0.08549611	0.088666667	72000	13134670	261321	17595	8.40E+03	13493986
2021	0.08549613	0.088666667	4000	13260870	263833	17398	8.48E+03	13554581
2022	0.08549616	0.088666667	4000	13387070	266345	17193	8.56E+03	13683170
2023	0.08549618	0.088666667	4000	13513271	268857	16982	8.64E+03	13811751
2024	0.08549621	0.088666667	4000	13639472	271369	16763	8.72E+03	13940326
2025	0.08549623	0.088666667	4000	13765673	273881	16538	8.80E+03	14068894
2026	0.08549626	0.088666667	4000	13891874	276393	16306	8.88E+03	14197455
2027	0.08549629	0.088666667	4000	14018075	278905	16066	8.96E+03	14326009
2028	0.08549632	0.088666667	4000	14144277	281417	15820	9.04E+03	14454557
2029	0.08549635	0.088666667	4000	14270479	283929	15566	9.12E+03	14583098
2030	0.08549638	0.088666667	4000	14396681	286441	15306	9.20E+03	14711632
2031	0.08549641	0.088666667	4000	14522883	288953	15039	9.28E+03	14840159
2032	0.08549644	0.088666667	4000	14649085	291465	14764	9.36E+03	14968679
2033	0.08549648	0.088666667	4000	14775288	293977	14483	9.44E+03	15097193
2034	0.08549651	0.088666667	4000	14901491	296489	14195	9.52E+03	15225700
2035	0.08549654	0.088666667	4000	15027694	299001	13900	9.61E+03	15354200
2036	0.08549658	0.088666667	4000	15153897	301513	13597	9.69E+03	15482694
2037	0.08549662	0.088666667	4000	15280101	304025	13288	9.77E+03	15611180
2038	0.08549665	0.088666667	4000	15406305	306537	12972	9.85E+03	15739660
2039	0.08549669	0.088666667	4000	15532509	309049	12649	9.93E+03	15868134
2040	0.08549673	0.088666667	4000	15658713	311561	12319	1.00E+04	15996600
2041	0.08549677	0.088666667	4000	15784918	314073	11981	1.01E+04	16125060
2042	0.08549681	0.088666667	4000	15911123	316585	11637	1.02E+04	16253513
2043	0.08549686	0.088666667	4000	16037328	319097	11286	1.02E+04	16381960
2044	0.08549690	0.088666667	4000	16163533	321609	10928	1.03E+04	16510400
2045	0.08549694	0.088666667	4000	16289739	324121	10563	1.04E+04	16638833
2046	0.08549699	0.088666667	4000	16415945	326633	10191	1.05E+04	16767259
2047	0.08549704	0.088666667	4000	16542152	329146	9812	1.06E+04	16895679
2048	0.08549708	0.088666667	4000	16668359	331658	9426	1.07E+04	17024092
2049	0.08549713	0.088666667	4000	16794566	334170	9033	1.07E+04	17152498
2050	0.08549718	0.088666667	4000	16920773	336682	8632	1.08E+04	17280898
2051	0.08549723	0.088666667	4000	17046981	339194	8225	1.09E+04	17409291
2052	0.08549728	0.088666667	4000	17173189	341706	7811	1.10E+04	17537678
2053	0.08549734	0.088666667	4000	17299398	344218	7391	1.11E+04	17666058
2054	0.08549739	0.088666667	4000	17425607	346730	7219	1.11E+04	17794687
2055	0.08549745	0.088666667	4000	17551816	349242	7271	1.12E+04	17923541
2056	0.08549750	0.088666667	4000	17678026	351754	7323	1.13E+04	18052396
2057	0.08549756	0.088666667	4000	17804236	354266	7376	1.14E+04	18181251
2058	0.08549762	0.088666667	4000	17930446	356778	7428	1.15E+04	18310106
2059	0.08549768	0.088666667	4000	18056657	359290	7480	1.15E+04	18438961
2060	0.08549774	0.088666667	4000	18182868	361802	7533	1.16E+04	18567817
Summe:		252000	7.0579E+08	14042938	584649	4.51E+05	7.21119E+08	721119073

Abbildung A.8: Kostenberechnung Variante 1 - SB2/SU2

A.2 Kostenberechnung der Varianten

Wartezeit: $\frac{t}{Fahrzeug}$		Kosten pro Jahr: Variante 1 - SB2/SU3					
		Unterhaltskosten	Reisezeitkosten	Betriebskosten	Umweltkosten	Unfallkosten	Totale Kosten pro Jahr
		K_U	K_{TT}	K_B	K_U	K_A	
2019	0.08549608	0.088666667	4000	13014208	258848	17786	8.34E+03
2020	0.08549611	0.088666667	72000	13140408	261360	17595	8.42E+03
2021	0.08549613	0.088666667	4000	13266608	263872	17398	8.51E+03
2022	0.08549616	0.088666667	4000	13392808	266384	17193	8.59E+03
2023	0.08549618	0.088666667	4000	13519009	268896	16982	8.67E+03
2024	0.08549621	0.088666667	4000	13645210	271408	16763	8.75E+03
2025	0.08549623	0.088666667	4000	13771411	273920	16538	8.83E+03
2026	0.08549626	0.088666667	4000	13897612	276432	16306	8.91E+03
2027	0.08549629	0.088666667	4000	14023813	278944	16066	8.99E+03
2028	0.08549632	0.088666667	4000	14150015	281456	15820	9.07E+03
2029	0.08549635	0.088666667	4000	14276217	283968	15566	9.15E+03
2030	0.08549638	0.088666667	4000	14402419	286480	15306	9.23E+03
2031	0.08549641	0.088666667	4000	14528621	288993	15039	9.31E+03
2032	0.08549644	0.088666667	4000	14654823	291505	14764	9.39E+03
2033	0.08549648	0.088666667	4000	14781026	294017	14483	9.47E+03
2034	0.08549651	0.088666667	4000	14907229	296529	14195	9.55E+03
2035	0.08549654	0.088666667	4000	15033432	299041	13900	9.63E+03
2036	0.08549658	0.088666667	4000	15159635	301553	13597	9.71E+03
2037	0.08549662	0.088666667	4000	15285839	304065	13288	9.79E+03
2038	0.08549665	0.088666667	4000	15412043	306577	12972	9.87E+03
2039	0.08549669	0.088666667	4000	15538247	309089	12649	9.95E+03
2040	0.08549673	0.088666667	4000	15664451	311601	12319	1.00E+04
2041	0.08549677	0.088666667	4000	15790656	314113	11981	1.01E+04
2042	0.08549681	0.088666667	4000	15916861	316625	11637	1.02E+04
2043	0.08549686	0.088666667	4000	16043066	319137	11286	1.03E+04
2044	0.08549690	0.088666667	4000	16169271	321649	10928	1.04E+04
2045	0.08549694	0.088666667	4000	16295477	324161	10563	1.04E+04
2046	0.08549699	0.088666667	4000	16421683	326673	10191	1.05E+04
2047	0.08549704	0.088666667	4000	16547890	329185	9812	1.06E+04
2048	0.08549708	0.088666667	4000	16674097	331697	9426	1.07E+04
2049	0.08549713	0.088666667	4000	16800304	334209	9033	1.08E+04
2050	0.08549718	0.088666667	4000	16926511	336721	8632	1.08E+04
2051	0.08549723	0.088666667	4000	17052719	339233	8225	1.09E+04
2052	0.08549727	0.088666667	4000	17178927	341745	7811	1.10E+04
2053	0.08549734	0.088666667	4000	17305136	344257	7391	1.11E+04
2054	0.08549739	0.088666667	4000	17431345	346769	7219	1.12E+04
2055	0.08549745	0.088666667	4000	17557554	349281	7271	1.12E+04
2056	0.08549750	0.088666667	4000	17683764	351793	7323	1.13E+04
2057	0.08549756	0.088666667	4000	17809974	354305	7376	1.14E+04
2058	0.08549762	0.088666667	4000	17936184	356817	7428	1.15E+04
2059	0.08549768	0.088666667	4000	18062395	359329	7480	1.16E+04
2060	0.08549774	0.088666667	4000	18188606	361841	7533	1.16E+04
Summe:		252000	7.0605E+08	14044751	584649	4.52E+05	7.21386E+08
721385963							

Abbildung A.9: Kostenberechnung Variante 1 - SB2/SU3

Anhang

Wartezeit: $\frac{t}{Fahrzeug}$		Kosten pro Jahr: Variante 1 - SB3/SU1					
		Unterhaltskosten	Reisezeitkosten	Betriebskosten	Umweltkosten	Unfallkosten	Totalen Kosten pro Jahr
		K_U	K_T	K_B	K_U	K_A	
2019	0.08549612	0.088666667	4000	13192032	262537	18045	8.42E+03
2020	0.08549616	0.088666667	72000	13813132	266305	17934	8.54E+03
2021	0.08549619	0.088666667	4000	13570633	270073	17812	8.66E+03
2022	0.08549623	0.088666667	4000	13759935	273842	17680	8.78E+03
2023	0.08549628	0.088666667	4000	13949237	277610	17537	8.90E+03
2024	0.08549632	0.088666667	4000	14138539	281378	17384	9.02E+03
2025	0.08549636	0.088666667	4000	14327842	285146	17221	9.14E+03
2026	0.08549641	0.088666667	4000	14517145	288914	17047	9.26E+03
2027	0.08549646	0.088666667	4000	14706448	292682	16862	9.38E+03
2028	0.08549651	0.088666667	4000	14895753	296450	16667	9.50E+03
2029	0.08549656	0.088666667	4000	15085057	300218	16462	9.62E+03
2030	0.08549662	0.088666667	4000	15274363	303986	16246	9.74E+03
2031	0.08549667	0.088666667	4000	15463669	307754	16020	9.86E+03
2032	0.08549673	0.088666667	4000	15652975	311522	15783	9.98E+03
2033	0.08549679	0.088666667	4000	15842282	315290	15535	1.01E+04
2034	0.08549686	0.088666667	4000	16031590	319058	15278	1.02E+04
2035	0.08549692	0.088666667	4000	16220898	322826	15009	1.03E+04
2036	0.08549699	0.088666667	4000	16410207	326594	14730	1.05E+04
2037	0.08549706	0.088666667	4000	16599517	330362	14441	1.06E+04
2038	0.08549713	0.088666667	4000	16788828	334130	14141	1.07E+04
2039	0.08549721	0.088666667	4000	16978139	337898	13831	1.08E+04
2040	0.08549728	0.088666667	4000	17167451	341666	13511	1.09E+04
2041	0.08549736	0.088666667	4000	17356764	345434	13179	1.11E+04
2042	0.08549745	0.088666667	4000	17546078	349202	12838	1.12E+04
2043	0.08549753	0.088666667	4000	17735392	352970	12486	1.13E+04
2044	0.08549762	0.088666667	4000	17924708	356738	12123	1.14E+04
2045	0.08549771	0.088666667	4000	18114025	360506	11750	1.15E+04
2046	0.08549781	0.088666667	4000	18303342	364274	11367	1.17E+04
2047	0.08549790	0.088666667	4000	18492660	368042	10973	1.18E+04
2048	0.08549800	0.088666667	4000	18681980	371811	10568	1.19E+04
2049	0.08549811	0.088666667	4000	18871300	375579	10153	1.20E+04
2050	0.08549821	0.088666667	4000	19060622	379347	9728	1.22E+04
2051	0.08549832	0.088666667	4000	19249945	383115	9292	1.23E+04
2052	0.08549844	0.088666667	4000	19439269	386883	8845	1.24E+04
2053	0.08549855	0.088666667	4000	19628594	390651	8388	1.25E+04
2054	0.08549867	0.088666667	4000	19817920	394419	8213	1.26E+04
2055	0.08549880	0.088666667	4000	20007247	398187	8291	1.28E+04
2056	0.08549892	0.088666667	4000	20196576	401955	8370	1.29E+04
2057	0.08549905	0.088666667	4000	20385905	405723	8448	1.30E+04
2058	0.08549919	0.088666667	4000	20575238	409491	8526	1.31E+04
2059	0.08549932	0.088666667	4000	20764571	413259	8605	1.32E+04
2060	0.08549947	0.088666667	4000	20953905	417027	8683	1.34E+04
Summe:		252000	7.6794E+08	15283321	625754	4.90E+05	7.84586E+08

Abbildung A.10: Kostenberechnung Variante 1 - SB3/SU1

A.2 Kostenberechnung der Varianten

Wartezeit: $\frac{t}{Fahrzeug}$		Kosten pro Jahr: Variante 1 - SB3/SU2					
		Unterhaltskosten	Reisezeitkosten	Betriebskosten	Umweltkosten	Unfallkosten	Totale Kosten pro Jahr
		K_U	K_{TT}	K_B	K_U	K_A	
2019	0.08549612	0.088666667	4000	13197770	262577	18045	8.44E+03
2020	0.08549616	0.088666667	72000	13387070	266345	17934	8.56E+03
2021	0.08549619	0.088666667	4000	13576371	270113	17812	8.68E+03
2022	0.08549623	0.088666667	4000	13765673	273881	17680	8.80E+03
2023	0.08549628	0.088666667	4000	13954975	277649	17537	8.92E+03
2024	0.08549632	0.088666667	4000	14144277	281417	17384	9.04E+03
2025	0.08549636	0.088666667	4000	14333580	285185	17221	9.16E+03
2026	0.08549641	0.088666667	4000	14522883	288953	17047	9.28E+03
2027	0.08549646	0.088666667	4000	14712186	292721	16862	9.40E+03
2028	0.08549651	0.088666667	4000	14901491	296489	16667	9.53E+03
2029	0.08549656	0.088666667	4000	15090795	300257	16462	9.65E+03
2030	0.08549662	0.088666667	4000	15280101	304025	16246	9.77E+03
2031	0.08549667	0.088666667	4000	15469407	307793	16020	9.89E+03
2032	0.08549673	0.088666667	4000	15658713	311561	15783	1.00E+04
2033	0.08549679	0.088666667	4000	15848020	315329	15535	1.01E+04
2034	0.08549686	0.088666667	4000	16037328	319097	15278	1.02E+04
2035	0.08549692	0.088666667	4000	16226636	322865	15009	1.04E+04
2036	0.08549699	0.088666667	4000	16415945	326633	14730	1.05E+04
2037	0.08549706	0.088666667	4000	16605255	330402	14441	1.06E+04
2038	0.08549713	0.088666667	4000	16794566	334170	14141	1.07E+04
2039	0.08549721	0.088666667	4000	16983877	337938	13831	1.09E+04
2040	0.08549728	0.088666667	4000	17173189	341706	13511	1.10E+04
2041	0.08549736	0.088666667	4000	17362502	345474	13179	1.11E+04
2042	0.08549745	0.088666667	4000	17551816	349242	12838	1.12E+04
2043	0.08549753	0.088666667	4000	17741131	353010	12486	1.13E+04
2044	0.08549762	0.088666667	4000	17930446	356778	12123	1.15E+04
2045	0.08549771	0.088666667	4000	18119763	360546	11750	1.16E+04
2046	0.08549781	0.088666667	4000	18309080	364314	11367	1.17E+04
2047	0.08549790	0.088666667	4000	18498398	368082	10973	1.18E+04
2048	0.08549800	0.088666667	4000	18687718	371850	10568	1.19E+04
2049	0.08549811	0.088666667	4000	18877038	375618	10153	1.21E+04
2050	0.08549821	0.088666667	4000	19066360	379386	9728	1.22E+04
2051	0.08549832	0.088666667	4000	19255683	383154	9292	1.23E+04
2052	0.08549844	0.088666667	4000	19445007	386922	8845	1.24E+04
2053	0.08549855	0.088666667	4000	19634332	390690	8388	1.25E+04
2054	0.08549867	0.088666667	4000	19823658	394458	8213	1.27E+04
2055	0.08549880	0.088666667	4000	20012985	398226	8291	1.28E+04
2056	0.08549892	0.088666667	4000	20202314	401994	8370	1.29E+04
2057	0.08549905	0.088666667	4000	20391645	405762	8448	1.30E+04
2058	0.08549919	0.088666667	4000	20580976	409530	8526	1.31E+04
2059	0.08549932	0.088666667	4000	20770309	413298	8605	1.33E+04
2060	0.08549947	0.088666667	4000	20959643	417066	8683	1.34E+04

Summe: 252000 7.6820E+08 15285135 625754 4.91E+05 7.8485E+08

Abbildung A.11: Kostenberechnung Variante 1 - SB3/SU2

Anhang

Wartezeit: $\frac{t}{Fahrzeug}$		Kosten pro Jahr: Variante 1 - SB3/SU3					
		Unterhaltskosten	Reisezeitkosten	Betriebskosten	Umweltkosten	Unfallkosten	Totalen Kosten pro Jahr
		K_U	K_T	K_B	K_U	K_A	
2019	0.08549612	0.088666667					13496634
2020	0.08549616	0.088666667	4000 13203508	262616 18045	8.47E+03		13757712
2021	0.08549619	0.088666667	72000 13392808	266384 17934	8.59E+03		13882780
2022	0.08549623	0.088666667	4000 13582109	270152 17812	8.71E+03		14075838
2023	0.08549628	0.088666667	4000 13771411	273920 17680	8.83E+03		14268886
2024	0.08549632	0.088666667	4000 13960713	277688 17537	8.95E+03		14461923
2025	0.08549636	0.088666667	4000 14150015	281456 17384	9.07E+03		14654951
2026	0.08549641	0.088666667	4000 14339318	285224 17221	9.19E+03		14847969
2027	0.08549646	0.088666667	4000 14528621	288993 17047	9.31E+03		15040977
2028	0.08549651	0.088666667	4000 14717925	292761 16862	9.43E+03		15233974
2029	0.08549656	0.088666667	4000 14907229	296529 16667	9.55E+03		15426962
2030	0.08549662	0.088666667	4000 15096533	300297 16462	9.67E+03		15619940
2031	0.08549667	0.088666667	4000 15285839	304065 16246	9.79E+03		15812908
2032	0.08549673	0.088666667	4000 15475145	307833 16020	9.91E+03		16005866
2033	0.08549679	0.088666667	4000 15664451	311601 15783	1.00E+04		16198815
2034	0.08549686	0.088666667	4000 15853758	315369 15535	1.02E+04		16391753
2035	0.08549692	0.088666667	4000 16043066	319137 15278	1.03E+04		16584682
2036	0.08549699	0.088666667	4000 16232374	322905 15009	1.04E+04		16777601
2037	0.08549706	0.088666667	4000 16421683	326673 14730	1.05E+04		16970510
2038	0.08549713	0.088666667	4000 16610993	330441 14441	1.06E+04		17163409
2039	0.08549721	0.088666667	4000 16800304	334209 14141	1.08E+04		17356299
2040	0.08549728	0.088666667	4000 16989615	337977 13831	1.09E+04		17549179
2041	0.08549736	0.088666667	4000 17178927	341745 13511	1.10E+04		17742049
2042	0.08549745	0.088666667	4000 17368240	345513 13179	1.11E+04		17934910
2043	0.08549753	0.088666667	4000 17557554	349281 12838	1.12E+04		18127761
2044	0.08549762	0.088666667	4000 17746869	353049 12486	1.14E+04		18320603
2045	0.08549771	0.088666667	4000 17936184	356817 12123	1.15E+04		18513435
2046	0.08549781	0.088666667	4000 18125501	360585 11750	1.16E+04		18706257
2047	0.08549790	0.088666667	4000 18314818	364353 11367	1.17E+04		18899070
2048	0.08549800	0.088666667	4000 18504136	368121 10973	1.18E+04		19091874
2049	0.08549811	0.088666667	4000 18693456	371889 10568	1.20E+04		19284668
2050	0.08549821	0.088666667	4000 18882776	375657 10153	1.21E+04		19477453
2051	0.08549832	0.088666667	4000 19072098	379425 9728	1.22E+04		19670228
2052	0.08549844	0.088666667	4000 19261421	383193 9292	1.23E+04		19862994
2053	0.08549855	0.088666667	4000 19450745	386962 8845	1.24E+04		20055751
2054	0.08549867	0.088666667	4000 19640070	390730 8388	1.26E+04		20248790
2055	0.08549880	0.088666667	4000 19829396	394498 8213	1.27E+04		20442084
2056	0.08549892	0.088666667	4000 20018724	398266 8291	1.28E+04		20635380
2057	0.08549905	0.088666667	4000 20208052	402034 8370	1.29E+04		20828678
2058	0.08549919	0.088666667	4000 20397383	405802 8448	1.30E+04		21021976
2059	0.08549932	0.088666667	4000 20586714	409570 8526	1.32E+04		21215276
2060	0.08549947	0.088666667	4000 20776047	413338 8605	1.33E+04		21408578
Summe:		252000	7.6846E+08	15286948	625754	4.92E+03	7.85120E+08

Abbildung A.12: Kostenberechnung Variante 1 - SB3/SU3

A.2 Kostenberechnung der Varianten

Wartezeit: $\frac{t}{Fahrzeug}$		Kosten pro Jahr: Variante 2 - SB1/SU1						
		Unterhaltskosten	Reisezeitkosten	Betriebskosten	Umweltkosten	Unfallkosten	Totale Kosten pro Jahr	
		K_U	K_{TT}	K_B	K_O	K_A		
2019	0.08600068	0.004	3600	12110785	255001	17527	8.17E+03	12395088
2020	0.08600070	0.004	1163600	12170445	256257	17257	8.22E+03	13615774
2021	0.08600071	0.004	7725	12230105	257513	16984	8.26E+03	12520582
2022	0.08600073	0.004	7725	12289765	258769	16707	8.30E+03	12581262
2023	0.08600074	0.004	7725	12349425	260025	16426	8.34E+03	12641938
2024	0.08600075	0.004	7725	12409085	261281	16143	8.38E+03	12702610
2025	0.08600077	0.004	7725	12468745	262537	15855	8.42E+03	12763279
2026	0.08600078	0.004	7725	12528406	263793	15564	8.46E+03	12823945
2027	0.08600080	0.004	7725	12588066	265049	15270	8.50E+03	12884607
2028	0.08600081	0.004	7725	12647726	266305	14972	8.54E+03	12945266
2029	0.08600083	0.004	7725	12707387	267561	14671	8.58E+03	13005921
2030	0.08600085	0.004	7725	12767047	268817	14366	8.62E+03	13066573
2031	0.08600086	0.004	7725	12826708	270073	14058	8.66E+03	13127221
2032	0.08600088	0.004	7725	12886368	271329	13746	8.70E+03	13187866
2033	0.08600089	0.004	7725	12946029	272585	13431	8.74E+03	13248508
2034	0.08600091	0.004	7725	13005690	273842	13112	8.78E+03	13309146
2035	0.08600093	0.004	7725	13065350	275098	12790	8.82E+03	13369781
2036	0.08600094	0.004	7725	13125011	276354	12464	8.86E+03	13430412
2037	0.08600096	0.004	7725	13184672	277610	12135	8.90E+03	13491040
2038	0.08600098	0.004	7725	13244333	278866	11802	8.94E+03	13551664
2039	0.08600100	0.004	7725	13303994	280122	11466	8.98E+03	13612285
2040	0.08600101	0.004	7725	13363655	281378	11126	9.02E+03	13672903
2041	0.08600103	0.004	7725	13423316	282634	10783	9.06E+03	13733517
2042	0.08600105	0.004	7725	13482977	283890	10437	9.10E+03	13794128
2043	0.08600107	0.004	7725	13542639	285146	10086	9.14E+03	13854735
2044	0.08600109	0.004	7725	13602300	286402	9733	9.18E+03	13915339
2045	0.08600111	0.004	7725	13661961	287658	9376	9.22E+03	13975939
2046	0.08600113	0.004	7725	13721623	288914	9015	9.26E+03	14036536
2047	0.08600115	0.004	7725	13781284	290170	8651	9.30E+03	14097130
2048	0.08600117	0.004	7725	13840946	291426	8283	9.34E+03	14157720
2049	0.08600119	0.004	7725	13900608	292682	7912	9.38E+03	14218306
2050	0.08600121	0.004	7725	13960269	293938	7537	9.42E+03	14278890
2051	0.08600123	0.004	7725	14019931	295194	7159	9.46E+03	14339470
2052	0.08600125	0.004	7725	14079593	296450	6778	9.50E+03	14400046
2053	0.08600127	0.004	7725	14139255	297706	6393	9.54E+03	14460619
2054	0.08600129	0.004	7725	14198917	298962	6225	9.58E+03	14521410
2055	0.08600132	0.004	7725	14258579	300218	6251	9.62E+03	14582394
2056	0.08600134	0.004	7725	14318241	301474	6277	9.66E+03	14643379
2057	0.08600136	0.004	7725	14377903	302730	6303	9.70E+03	14704363
2058	0.08600138	0.004	7725	14437566	303986	6329	9.74E+03	14765348
2059	0.08600141	0.004	7725	14497228	305242	6356	9.78E+03	14826333
2060	0.08600143	0.004	7725	14556890	306498	6382	9.82E+03	14887317
Summe:		1490600	6.0787E+08	1279827	543544	4.10E+05	6.23111E+08	
623110678								

Abbildung A.13: Kostenberechnung Variante 2 - SB1/SU1

Anhang

Wartezeit: $\frac{\tau}{Fahrzeug}$		Kosten pro Jahr: Variante 2 - SB1/SU2						
		Unterhaltskosten	Reisezeitkosten	Betriebskosten	Umweltkosten	Unfallkosten	Totalen Kosten pro Jahr	
t_{MIV} [h]	t_{Velo} [h]	K_U	K_T	K_B	K_U	K_A		
2019	0.08600068	3600	12111044	255041	17527	8.20E+03	12395411	
2020	0.08600070	1163600	12170704	256297	17257	8.24E+03	13616097	
2021	0.08600071	0.004	7725	12230364	257553	16984	8.28E+03	12520905
2022	0.08600073	0.004	7725	12290024	258809	16707	8.32E+03	12581584
2023	0.08600074	0.004	7725	12349684	260065	16426	8.36E+03	12642260
2024	0.08600075	0.004	7725	12409344	261321	16143	8.40E+03	12702933
2025	0.08600077	0.004	7725	12469004	262577	15855	8.44E+03	12763602
2026	0.08600078	0.004	7725	12528665	263833	15564	8.48E+03	12824268
2027	0.08600080	0.004	7725	12588325	265089	15270	8.52E+03	12884930
2028	0.08600081	0.004	7725	12647985	266345	14972	8.56E+03	12945589
2029	0.08600083	0.004	7725	12707646	267601	14671	8.60E+03	13006244
2030	0.08600085	0.004	7725	12767306	268857	14366	8.64E+03	13066896
2031	0.08600086	0.004	7725	12826967	270113	14058	8.68E+03	13127544
2032	0.08600088	0.004	7725	12886627	271369	13746	8.72E+03	13188189
2033	0.08600089	0.004	7725	12946288	272625	13431	8.76E+03	13248831
2034	0.08600091	0.004	7725	13005949	273881	13112	8.80E+03	13309469
2035	0.08600093	0.004	7725	13065609	275137	12790	8.84E+03	13370104
2036	0.08600094	0.004	7725	13125270	276393	12464	8.88E+03	13430735
2037	0.08600096	0.004	7725	13184931	277649	12135	8.92E+03	13491363
2038	0.08600098	0.004	7725	13244592	278905	11802	8.96E+03	13551987
2039	0.08600100	0.004	7725	13304253	280161	11466	9.00E+03	13612608
2040	0.08600101	0.004	7725	13363914	281417	11126	9.04E+03	13673226
2041	0.08600103	0.004	7725	13423575	282673	10783	9.08E+03	13733840
2042	0.08600105	0.004	7725	13483236	283929	10437	9.12E+03	13794450
2043	0.08600107	0.004	7725	13542898	285185	10086	9.16E+03	13855058
2044	0.08600109	0.004	7725	13602559	286441	9733	9.20E+03	13915661
2045	0.08600111	0.004	7725	13662220	287697	9376	9.24E+03	13976262
2046	0.08600113	0.004	7725	13721882	288953	9015	9.28E+03	14036859
2047	0.08600115	0.004	7725	13781543	290209	8651	9.32E+03	14097452
2048	0.08600117	0.004	7725	13841205	291465	8283	9.36E+03	14158043
2049	0.08600119	0.004	7725	13900866	292721	7912	9.40E+03	14218629
2050	0.08600121	0.004	7725	13960528	293977	7537	9.44E+03	14279213
2051	0.08600123	0.004	7725	14020190	295233	7159	9.49E+03	14339792
2052	0.08600125	0.004	7725	14079852	296489	6778	9.53E+03	14400369
2053	0.08600127	0.004	7725	14139514	297745	6393	9.57E+03	14460942
2054	0.08600129	0.004	7725	14199176	299001	6225	9.61E+03	14521732
2055	0.08600132	0.004	7725	14258838	300257	6251	9.65E+03	14582717
2056	0.08600134	0.004	7725	14318500	301513	6277	9.69E+03	14643701
2057	0.08600136	0.004	7725	14378162	302769	6303	9.73E+03	14704686
2058	0.08600138	0.004	7725	14437824	304025	6329	9.77E+03	14765671
2059	0.08600141	0.004	7725	14497487	305281	6356	9.81E+03	14826655
2060	0.08600143	0.004	7725	14557149	306537	6382	9.85E+03	14887640
Summe:		1490600	6.0788E+08	12800741	543544	4.11E+05	6.23126E+08	
623125527								

Abbildung A.14: Kostenberechnung Variante 2 - SB1/SU2

A.2 Kostenberechnung der Varianten

Wartezeit: $\frac{t}{Fahrzeug}$		Kosten pro Jahr: Variante 2 - SB1/SU3					
		Unterhaltskosten	Reisezeitkosten	Betriebskosten	Umweltkosten	Unfallkosten	Totale Kosten pro Jahr
		K_U	K_{TT}	K_B	K_O	K_A	
2019	0.08600068	0.004	3600	12111303	255080	17527	8.22E+03
2020	0.08600070	0.004	1163600	12170963	256336	17257	8.26E+03
2021	0.08600071	0.004	7725	12230623	257592	16984	8.30E+03
2022	0.08600073	0.004	7725	12290283	258848	16707	8.34E+03
2023	0.08600074	0.004	7725	12349943	260104	16426	8.38E+03
2024	0.08600075	0.004	7725	12409603	261360	16143	8.42E+03
2025	0.08600077	0.004	7725	12469263	262616	15855	8.47E+03
2026	0.08600078	0.004	7725	12528923	263872	15564	8.51E+03
2027	0.08600080	0.004	7725	12588584	265128	15270	8.55E+03
2028	0.08600081	0.004	7725	12648244	266384	14972	8.59E+03
2029	0.08600083	0.004	7725	12707905	267640	14671	8.63E+03
2030	0.08600085	0.004	7725	12767565	268896	14366	8.67E+03
2031	0.08600086	0.004	7725	12827226	270152	14058	8.71E+03
2032	0.08600088	0.004	7725	12886886	271408	13746	8.75E+03
2033	0.08600089	0.004	7725	12946547	272664	13431	8.79E+03
2034	0.08600091	0.004	7725	13006207	273920	13112	8.83E+03
2035	0.08600093	0.004	7725	13065868	275176	12790	8.87E+03
2036	0.08600094	0.004	7725	13125529	276432	12464	8.91E+03
2037	0.08600096	0.004	7725	13185190	277688	12135	8.95E+03
2038	0.08600098	0.004	7725	13244851	278944	11802	8.99E+03
2039	0.08600100	0.004	7725	13304512	280200	11466	9.03E+03
2040	0.08600101	0.004	7725	13364173	281456	11126	9.07E+03
2041	0.08600103	0.004	7725	13423834	282712	10783	9.11E+03
2042	0.08600105	0.004	7725	13483495	283968	10437	9.15E+03
2043	0.08600107	0.004	7725	13543156	285224	10086	9.19E+03
2044	0.08600109	0.004	7725	13602818	286480	9733	9.23E+03
2045	0.08600111	0.004	7725	13662479	287736	9376	9.27E+03
2046	0.08600113	0.004	7725	13722140	288993	9015	9.31E+03
2047	0.08600115	0.004	7725	13781802	290249	8651	9.35E+03
2048	0.08600117	0.004	7725	13841464	291505	8283	9.39E+03
2049	0.08600119	0.004	7725	13901125	292761	7912	9.43E+03
2050	0.08600121	0.004	7725	13960787	294017	7537	9.47E+03
2051	0.08600123	0.004	7725	14020449	295273	7159	9.51E+03
2052	0.08600125	0.004	7725	14080111	296529	6778	9.55E+03
2053	0.08600127	0.004	7725	14139773	297785	6393	9.59E+03
2054	0.08600129	0.004	7725	14199435	299041	6225	9.63E+03
2055	0.08600132	0.004	7725	14259097	300297	6251	9.67E+03
2056	0.08600134	0.004	7725	14318759	301553	6277	9.71E+03
2057	0.08600136	0.004	7725	14378421	302809	6303	9.75E+03
2058	0.08600138	0.004	7725	14438083	304065	6329	9.79E+03
2059	0.08600141	0.004	7725	14497746	305321	6356	9.83E+03
2060	0.08600143	0.004	7725	14557408	306577	6382	9.87E+03
Summe:		1490600	6.0789E+08	12802554	543544	4.12E+05	6.23140E+08
623140375							

Abbildung A.15: Kostenberechnung Variante 2 - SB1/SU3

Anhang

Wartezeit: $\frac{\tau}{Fahrzeug}$		Kosten pro Jahr: Variante 2 - SB2/SU1						
t_{MIV} [h]	t_{Velo} [h]	Unterhaltskosten	Reisezeitkosten	Betriebskosten	Umweltkosten	Unfallkosten	Totalen Kosten pro Jahr	
K_U	K_T	K_B	K_I	K_A				
2019	0.08600073	0.004	3600	12289765	258769	17786	8.30E+03	12578216
2020	0.08600075	0.004	1163600	12409085	261281	17595	8.38E+03	13859938
2021	0.08600078	0.004	7725	12528406	263793	17398	8.46E+03	12825778
2022	0.08600081	0.004	7725	12647726	266305	17193	8.54E+03	12947487
2023	0.08600085	0.004	7725	12767047	268817	16982	8.62E+03	13069189
2024	0.08600088	0.004	7725	12886368	271329	16763	8.70E+03	13190884
2025	0.08600091	0.004	7725	13005690	273842	16538	8.78E+03	13125727
2026	0.08600094	0.004	7725	13125011	276354	16306	8.86E+03	13434253
2027	0.08600098	0.004	7725	13244333	278866	16066	8.94E+03	13555928
2028	0.08600101	0.004	7725	13363655	281378	15820	9.02E+03	13677596
2029	0.08600105	0.004	7725	13482977	283890	15566	9.10E+03	13799258
2030	0.08600109	0.004	7725	13602300	286402	15306	9.18E+03	13920912
2031	0.08600113	0.004	7725	13721623	288914	15039	9.26E+03	14042560
2032	0.08600117	0.004	7725	13840946	291426	14764	9.34E+03	14164201
2033	0.08600121	0.004	7725	13960267	293938	14483	9.42E+03	14285836
2034	0.08600125	0.004	7725	14079593	296450	14195	9.50E+03	14407463
2035	0.08600129	0.004	7725	14198917	298962	13900	9.58E+03	14529084
2036	0.08600134	0.004	7725	14318241	301474	13597	9.66E+03	14650699
2037	0.08600138	0.004	7725	14437566	303986	13288	9.74E+03	14772306
2038	0.08600143	0.004	7725	14556890	306498	12972	9.82E+03	14893907
2039	0.08600148	0.004	7725	14676216	309010	12649	9.90E+03	15015502
2040	0.08600152	0.004	7725	14795541	311522	12319	9.98E+03	15137090
2041	0.08600157	0.004	7725	14914867	314034	11981	1.01E+04	15258671
2042	0.08600163	0.004	7725	15034193	316546	11637	1.01E+04	15380245
2043	0.08600168	0.004	7725	15153520	319058	11286	1.02E+04	15501813
2044	0.08600173	0.004	7725	15272847	321570	10928	1.03E+04	15623374
2045	0.08600179	0.004	7725	15392174	324082	10563	1.04E+04	15744929
2046	0.08600184	0.004	7725	15511502	326594	10191	1.05E+04	15866477
2047	0.08600190	0.004	7725	15630830	329106	9812	1.05E+04	15988018
2048	0.08600196	0.004	7725	15750158	331618	9426	1.06E+04	16109553
2049	0.08600202	0.004	7725	15869487	334130	9033	1.07E+04	16231081
2050	0.08600208	0.004	7725	15988817	336642	8632	1.08E+04	16352603
2051	0.08600214	0.004	7725	16108146	339154	8225	1.09E+04	16474118
2052	0.08600221	0.004	7725	16227477	341666	7811	1.09E+04	16595626
2053	0.08600227	0.004	7725	16346807	344178	7391	1.10E+04	16717128
2054	0.08600234	0.004	7725	16466138	346690	7219	1.11E+04	16838880
2055	0.08600241	0.004	7725	16585470	349202	7271	1.12E+04	16960856
2056	0.08600248	0.004	7725	16704802	351714	7323	1.13E+04	17082833
2057	0.08600255	0.004	7725	16824134	354226	7376	1.13E+04	17204810
2058	0.08600262	0.004	7725	16943467	356738	7428	1.14E+04	17326788
2059	0.08600270	0.004	7725	17062801	359250	7480	1.15E+04	17448766
2060	0.08600277	0.004	7725	17182135	361762	7533	1.16E+04	17570745
Summe:		1490600	6.6687E+08	14041124	584649	4.50E+05	6.83440E+08	

Abbildung A.16: Kostenberechnung Variante 2 - SB2/SU1

A.2 Kostenberechnung der Varianten

Wartezeit: $\frac{t}{Fahrzeug}$		Kosten pro Jahr: Variante 2 - SB2/SU2					
		Unterhaltskosten	Reisezeitkosten	Betriebskosten	Umweltkosten	Unfallkosten	Totale Kosten pro Jahr
		K_U	K_{TT}	K_B	K_O	K_A	
2019	0.08600073	0.004	3600	12290024	258809	17786	8.32E+03
2020	0.08600075	0.004	1163600	12409344	261321	17595	8.40E+03
2021	0.08600078	0.004	7725	12528665	263833	17398	8.48E+03
2022	0.08600081	0.004	7725	12647985	266345	17193	8.56E+03
2023	0.08600085	0.004	7725	12767306	268857	16982	8.64E+03
2024	0.08600088	0.004	7725	12886627	271369	16763	8.72E+03
2025	0.08600091	0.004	7725	13005949	273881	16538	8.80E+03
2026	0.08600094	0.004	7725	13125270	276393	16306	8.88E+03
2027	0.08600098	0.004	7725	13244592	278905	16066	8.96E+03
2028	0.08600101	0.004	7725	13363914	281417	15820	9.04E+03
2029	0.08600105	0.004	7725	13483236	283929	15566	9.12E+03
2030	0.08600109	0.004	7725	13602559	286441	15306	9.20E+03
2031	0.08600113	0.004	7725	13721882	288953	15039	9.28E+03
2032	0.08600117	0.004	7725	13841205	291465	14764	9.36E+03
2033	0.08600121	0.004	7725	13960528	293977	14483	9.44E+03
2034	0.08600125	0.004	7725	14079852	296489	14195	9.52E+03
2035	0.08600129	0.004	7725	14199176	299001	13900	9.61E+03
2036	0.08600134	0.004	7725	14318500	301513	13597	9.69E+03
2037	0.08600138	0.004	7725	14437824	304025	13288	9.77E+03
2038	0.08600143	0.004	7725	14557149	306537	12972	9.85E+03
2039	0.08600148	0.004	7725	14676475	309049	12649	9.93E+03
2040	0.08600152	0.004	7725	14795800	311561	12319	1.00E+04
2041	0.08600157	0.004	7725	14915126	314073	11981	1.01E+04
2042	0.08600163	0.004	7725	15034452	316585	11637	1.02E+04
2043	0.08600168	0.004	7725	15153779	319097	11286	1.02E+04
2044	0.08600173	0.004	7725	15273106	321609	10928	1.03E+04
2045	0.08600179	0.004	7725	15392433	324121	10563	1.04E+04
2046	0.08600184	0.004	7725	15511761	326633	10191	1.05E+04
2047	0.08600190	0.004	7725	15631089	329146	9812	1.06E+04
2048	0.08600196	0.004	7725	15750417	331658	9426	1.07E+04
2049	0.08600202	0.004	7725	15869746	334170	9033	1.07E+04
2050	0.08600208	0.004	7725	15989075	336682	8632	1.08E+04
2051	0.08600214	0.004	7725	16108405	339194	8225	1.09E+04
2052	0.08600221	0.004	7725	16227735	341706	7811	1.10E+04
2053	0.08600227	0.004	7725	16347066	344218	7391	1.11E+04
2054	0.08600234	0.004	7725	16466397	346730	7219	1.11E+04
2055	0.08600241	0.004	7725	16585729	349242	7271	1.12E+04
2056	0.08600248	0.004	7725	16705061	351754	7323	1.13E+04
2057	0.08600255	0.004	7725	16824393	354266	7376	1.14E+04
2058	0.08600262	0.004	7725	16943726	356778	7428	1.15E+04
2059	0.08600270	0.004	7725	17063060	359290	7480	1.15E+04
2060	0.08600277	0.004	7725	17182394	361802	7533	1.16E+04
Summe:		1490600	6.6689E+08	14042938	584649	4.51E+05	6.8345E+08
683454997							

Abbildung A.17: Kostenberechnung Variante 2 - SB2/SU2

Anhang

Wartezeit: $\frac{\tau}{Fahrzeug}$		Kosten pro Jahr: Variante 2 - SB2/SU3						
t_{MIV} [h]	t_{Velo} [h]	Unterhaltskosten	Reisezeitkosten	Betriebskosten	Umweltkosten	Unfallkosten	Totalte Kosten pro Jahr	
K_U	K_T	K_B	K_I	K_A				
2019	0.08600073	0.004	3600	12290283	258848	17786	8.34E+03	12578861
2020	0.08600075	0.004	1163600	12409603	261360	17595	8.42E+03	13860583
2021	0.08600078	0.004	7725	12528923	263872	17398	8.51E+03	12826424
2022	0.08600081	0.004	7725	12648244	266384	17193	8.59E+03	12948132
2023	0.08600085	0.004	7725	12767565	268896	16982	8.67E+03	13069834
2024	0.08600088	0.004	7725	12886886	271408	16763	8.75E+03	13191529
2025	0.08600091	0.004	7725	13006207	273920	16538	8.83E+03	13132127
2026	0.08600094	0.004	7725	13125529	276432	16306	8.91E+03	13434899
2027	0.08600098	0.004	7725	13244851	278944	16066	8.99E+03	13556574
2028	0.08600101	0.004	7725	13364173	281456	15820	9.07E+03	13678242
2029	0.08600105	0.004	7725	13483495	283968	15566	9.15E+03	13799903
2030	0.08600109	0.004	7725	13602818	286480	15306	9.23E+03	13921558
2031	0.08600113	0.004	7725	13722140	288993	15039	9.31E+03	14043206
2032	0.08600117	0.004	7725	13841464	291505	14764	9.39E+03	14164847
2033	0.08600121	0.004	7725	13960787	294017	14483	9.47E+03	14286481
2034	0.08600125	0.004	7725	14080111	296529	14195	9.55E+03	14408109
2035	0.08600129	0.004	7725	14199435	299041	13900	9.63E+03	14529730
2036	0.08600134	0.004	7725	14318759	301553	13597	9.71E+03	14651344
2037	0.08600138	0.004	7725	14438083	304065	13288	9.79E+03	14772952
2038	0.08600143	0.004	7725	14557408	306577	12972	9.87E+03	14894553
2039	0.08600148	0.004	7725	14676733	309089	12649	9.95E+03	15016147
2040	0.08600152	0.004	7725	14796059	311601	12319	1.00E+04	15137735
2041	0.08600157	0.004	7725	14915385	314113	11981	1.01E+04	15259316
2042	0.08600163	0.004	7725	15034711	316625	11637	1.02E+04	15380891
2043	0.08600168	0.004	7725	15154038	319137	11286	1.03E+04	15502458
2044	0.08600173	0.004	7725	15273365	321649	10928	1.04E+04	15624020
2045	0.08600179	0.004	7725	15392692	324161	10563	1.04E+04	15745574
2046	0.08600184	0.004	7725	15512020	326673	10191	1.05E+04	15867122
2047	0.08600190	0.004	7725	15631348	329185	9812	1.06E+04	15988664
2048	0.08600196	0.004	7725	15750676	331697	9426	1.07E+04	16110198
2049	0.08600202	0.004	7725	15870005	334209	9033	1.08E+04	16231727
2050	0.08600208	0.004	7725	15989334	336721	8632	1.08E+04	16353248
2051	0.08600214	0.004	7725	16108664	339233	8225	1.09E+04	16474763
2052	0.08600221	0.004	7725	16227994	341745	7811	1.10E+04	16596272
2053	0.08600227	0.004	7725	16347325	344257	7391	1.11E+04	16717774
2054	0.08600234	0.004	7725	16466656	346769	7219	1.12E+04	16839526
2055	0.08600241	0.004	7725	16585988	349281	7271	1.12E+04	16961502
2056	0.08600248	0.004	7725	16705320	351793	7323	1.13E+04	17083479
2057	0.08600255	0.004	7725	16824652	354305	7376	1.14E+04	17205456
2058	0.08600262	0.004	7725	16943985	356817	7428	1.15E+04	17327434
2059	0.08600270	0.004	7725	17063319	359329	7480	1.16E+04	17440412
2060	0.08600277	0.004	7725	17182653	361841	7533	1.16E+04	1751391
Summe:		1490600	6.6690E+08	1444751	584649	4.52E+05	6.83470E+08	

Abbildung A.18: Kostenberechnung Variante 2 - SB2/SU3

A.2 Kostenberechnung der Varianten

Wartezeit: $\frac{t}{Fahrzeug}$		Kosten pro Jahr: Variante 2 - SB3/SU1					
		Unterhaltskosten	Reisezeitkosten	Betriebskosten	Umweltkosten	Unfallkosten	Totale Kosten pro Jahr
		K_U	K_{TT}	K_B	K_O	K_A	
2019	0.08600077	0.004	3600	12468745	262537	18045	8.42E+03
2020	0.08600081	0.004	1163600	12647726	266305	17934	8.54E+03
2021	0.08600086	0.004	7725	12826708	270073	17812	8.66E+03
2022	0.08600091	0.004	7725	13005690	273842	17680	8.78E+03
2023	0.08600096	0.004	7725	13184672	277610	17537	8.90E+03
2024	0.08600101	0.004	7725	13363655	281378	17384	9.02E+03
2025	0.08600107	0.004	7725	13542639	285146	17221	9.14E+03
2026	0.08600113	0.004	7725	13721623	288914	17047	9.26E+03
2027	0.08600119	0.004	7725	13900608	292682	16862	9.38E+03
2028	0.08600125	0.004	7725	14079593	296450	16667	9.50E+03
2029	0.08600132	0.004	7725	14258579	300218	16462	9.62E+03
2030	0.08600138	0.004	7725	14437566	303986	16246	9.74E+03
2031	0.08600145	0.004	7725	14616553	307754	16020	9.86E+03
2032	0.08600152	0.004	7725	14795541	311522	15783	9.98E+03
2033	0.08600160	0.004	7725	14974530	315290	15535	1.01E+04
2034	0.08600168	0.004	7725	15153520	319058	15278	1.02E+04
2035	0.08600176	0.004	7725	15332510	322826	15009	1.03E+04
2036	0.08600184	0.004	7725	15511502	326594	14730	1.05E+04
2037	0.08600193	0.004	7725	15690494	330362	14441	1.06E+04
2038	0.08600202	0.004	7725	15869487	334130	14141	1.07E+04
2039	0.08600211	0.004	7725	16048481	337898	13831	1.08E+04
2040	0.08600221	0.004	7725	16227477	341666	13511	1.09E+04
2041	0.08600231	0.004	7725	16406473	345434	13179	1.11E+04
2042	0.08600241	0.004	7725	16585470	349202	12838	1.12E+04
2043	0.08600251	0.004	7725	16764468	352970	12486	1.13E+04
2044	0.08600262	0.004	7725	16943467	356738	12123	1.14E+04
2045	0.08600273	0.004	7725	17122468	360506	11750	1.15E+04
2046	0.08600285	0.004	7725	17301470	364274	11367	1.17E+04
2047	0.08600297	0.004	7725	17480473	368042	10973	1.18E+04
2048	0.08600309	0.004	7725	17659477	371811	10568	1.19E+04
2049	0.08600322	0.004	7725	17838482	375579	10153	1.20E+04
2050	0.08600335	0.004	7725	18017489	379347	9728	1.22E+04
2051	0.08600349	0.004	7725	18196497	383115	9292	1.23E+04
2052	0.08600363	0.004	7725	18375507	386883	8845	1.24E+04
2053	0.08600377	0.004	7725	18554518	390651	8388	1.25E+04
2054	0.08600392	0.004	7725	18733531	394419	8213	1.26E+04
2055	0.08600407	0.004	7725	18912545	398187	8291	1.28E+04
2056	0.08600423	0.004	7725	19091560	401955	8370	1.29E+04
2057	0.08600439	0.004	7725	19270578	405723	8448	1.30E+04
2058	0.08600455	0.004	7725	19449597	409491	8526	1.31E+04
2059	0.08600472	0.004	7725	19628618	413259	8605	1.32E+04
2060	0.08600490	0.004	7725	19807640	417027	8683	1.34E+04
Summe:		1490600	7.2588E+08	15283321	625754	4.90E+05	7.43773E+08
74377292							

Abbildung A.19: Kostenberechnung Variante 2 - SB3/SU1

Anhang

Wartezeit: $\frac{\tau}{Fahrzeug}$		Kosten pro Jahr: Variante 2 - SB3/SU2					
t_{MIV} [h]	t_{Velo} [h]	Unterhaltskosten K_U	Reisezeitkosten K_T	Betriebskosten K_B	Umweltkosten K_U	Unfallkosten K_A	Totalen Kosten pro Jahr
2019	0.08600077	3600	12469004	262577	18045	8.44E+03	12761666
2020	0.08600081	1163600	12647985	266345	17934	8.56E+03	14104425
2021	0.08600086	7725	12826967	270113	17812	8.68E+03	13131298
2022	0.08600091	7725	13005949	273881	17680	8.80E+03	13314037
2023	0.08600096	7725	13184931	277649	17537	8.92E+03	13496765
2024	0.08600101	7725	13363914	281417	17384	9.04E+03	13679483
2025	0.08600107	7725	13542898	285185	17221	9.16E+03	13862192
2026	0.08600113	7725	13721882	288953	17047	9.28E+03	14044891
2027	0.08600119	7725	13900866	292721	16862	9.40E+03	14227580
2028	0.08600125	7725	14079852	296489	16667	9.53E+03	14410259
2029	0.08600132	7725	14258838	300257	16462	9.65E+03	14592928
2030	0.08600138	7725	14437824	304025	16246	9.77E+03	14775587
2031	0.08600145	7725	14616812	307793	16020	9.89E+03	14958237
2032	0.08600152	7725	14795800	311561	15783	1.00E+04	15140877
2033	0.08600160	7725	14974789	315329	15535	1.01E+04	15323507
2034	0.08600168	7725	15153779	319097	15278	1.02E+04	15506127
2035	0.08600176	7725	15332769	322865	15009	1.04E+04	15688738
2036	0.08600184	7725	15511761	326633	14730	1.05E+04	15871339
2037	0.08600193	7725	15690753	330402	14441	1.06E+04	16053931
2038	0.08600202	7725	15869746	334170	14141	1.07E+04	16236513
2039	0.08600211	7725	16048740	337938	13831	1.09E+04	16419085
2040	0.08600221	7725	16227735	341706	13511	1.10E+04	16601648
2041	0.08600231	7725	16406731	345474	13179	1.11E+04	16784202
2042	0.08600241	7725	16585729	349242	12838	1.12E+04	16966746
2043	0.08600251	7725	16764727	353010	12486	1.13E+04	17149281
2044	0.08600262	7725	16943726	356778	12123	1.15E+04	17331806
2045	0.08600273	7725	17122727	360546	11750	1.16E+04	17514322
2046	0.08600285	7725	17301728	364314	11367	1.17E+04	17696829
2047	0.08600297	7725	17480731	368082	10973	1.18E+04	17879326
2048	0.08600309	7725	17659736	371850	10568	1.19E+04	18061815
2049	0.08600322	7725	17838741	375618	10153	1.21E+04	18244294
2050	0.08600335	7725	18017748	379386	9728	1.22E+04	18426764
2051	0.08600349	7725	18196756	383154	9292	1.23E+04	18609224
2052	0.08600363	7725	18375766	386922	8845	1.24E+04	18791676
2053	0.08600377	7725	18554777	390690	8388	1.25E+04	18974119
2054	0.08600392	7725	18733789	394458	8213	1.27E+04	19156844
2055	0.08600407	7725	18912804	398226	8291	1.28E+04	19339825
2056	0.08600423	7725	19091819	401994	8370	1.29E+04	19522808
2057	0.08600439	7725	19270837	405762	8448	1.30E+04	19705793
2058	0.08600455	7725	19449856	409530	8526	1.31E+04	19888779
2059	0.08600472	7725	19628877	413298	8605	1.33E+04	20071767
2060	0.08600490	7725	19807899	417066	8683	1.34E+04	20254756
Summe:		1490600	7.2590E+08	15285135	625754	4.91E+05	7.43788E+08

Abbildung A.20: Kostenberechnung Variante 2 - SB3/SU2

A.2 Kostenberechnung der Varianten

Wartezeit: $\frac{t}{Fahrzeug}$		Kosten pro Jahr: Variante 2 - SB3/SU3					
		Unterhaltskosten	Reisezeitkosten	Betriebskosten	Umweltkosten	Unfallkosten	Totale Kosten pro Jahr
		K_U	K_{TT}	K_B	K_O	K_A	
2019	0.08600077	0.004	3600	12469263	262616	18045	8.47E+03
2020	0.08600081	0.004	1163600	12648244	266384	17934	8.59E+03
2021	0.08600086	0.004	7725	12827226	270152	17812	8.71E+03
2022	0.08600091	0.004	7725	1306207	273920	17680	8.83E+03
2023	0.08600096	0.004	7725	13185190	277688	17537	8.95E+03
2024	0.08600101	0.004	7725	13364173	281456	17384	9.07E+03
2025	0.08600107	0.004	7725	13543156	285224	17221	9.19E+03
2026	0.08600113	0.004	7725	13722140	288993	17047	9.31E+03
2027	0.08600119	0.004	7725	13901125	292761	16862	9.43E+03
2028	0.08600125	0.004	7725	14080111	296529	16667	9.55E+03
2029	0.08600132	0.004	7725	14259097	300297	16462	9.67E+03
2030	0.08600138	0.004	7725	14438083	304065	16246	9.79E+03
2031	0.08600145	0.004	7725	14617071	307833	16020	9.91E+03
2032	0.08600152	0.004	7725	14796059	311601	15783	1.00E+04
2033	0.08600160	0.004	7725	14975048	315369	15535	1.02E+04
2034	0.08600168	0.004	7725	15150438	319137	15278	1.03E+04
2035	0.08600176	0.004	7725	15333028	322905	15009	1.04E+04
2036	0.08600184	0.004	7725	15512020	326673	14730	1.05E+04
2037	0.08600193	0.004	7725	15691012	330441	14441	1.06E+04
2038	0.08600202	0.004	7725	15870005	334209	14141	1.08E+04
2039	0.08600211	0.004	7725	16048999	337977	13831	1.09E+04
2040	0.08600221	0.004	7725	16227994	341745	13511	1.10E+04
2041	0.08600231	0.004	7725	16406990	345513	13179	1.11E+04
2042	0.08600241	0.004	7725	16585988	349281	12838	1.12E+04
2043	0.08600251	0.004	7725	16764986	353049	12486	1.14E+04
2044	0.08600262	0.004	7725	16943985	356817	12123	1.15E+04
2045	0.08600273	0.004	7725	17122986	360585	11750	1.16E+04
2046	0.08600285	0.004	7725	17301987	364353	11367	1.17E+04
2047	0.08600297	0.004	7725	17480990	368121	10973	1.18E+04
2048	0.08600309	0.004	7725	17659994	371889	10568	1.20E+04
2049	0.08600322	0.004	7725	17839000	375657	10153	1.21E+04
2050	0.08600335	0.004	7725	18018007	379425	9728	1.22E+04
2051	0.08600349	0.004	7725	18197015	383193	9292	1.23E+04
2052	0.08600363	0.004	7725	18376025	386962	8845	1.24E+04
2053	0.08600377	0.004	7725	18555036	390730	8388	1.26E+04
2054	0.08600392	0.004	7725	18734048	394498	8213	1.27E+04
2055	0.08600407	0.004	7725	18913062	398266	8291	1.28E+04
2056	0.08600423	0.004	7725	19092078	402034	8370	1.29E+04
2057	0.08600439	0.004	7725	19271096	405802	8448	1.30E+04
2058	0.08600455	0.004	7725	19450115	409570	8526	1.32E+04
2059	0.08600472	0.004	7725	19629135	413338	8605	1.33E+04
2060	0.08600490	0.004	7725	19808158	417106	8683	1.34E+04
Summe:		1490600	7.2591E+08	15286948	625754	4.92E+05	7.43802E+08
743802488							

Abbildung A.21: Kostenberechnung Variante 2 - SB3/SU3

Anhang

Wartezeit: τ Fahrzeug		Kosten pro Jahr: Variante 3 - SB1/SU1						
t_{MIV} [h]	t_{Velo} [h]	K_U	K_T	K_B	K_U	K_A	Totale Kosten pro Jahr	
2019	0.11934429	0.002666667	3600	16779947	255001	17527	8.17E+03	17064250
2020	0.11934466	0.002666667	1511350	1862637	256257	17257	8.22E+03	18655716
2021	0.11934472	0.002666667	10100	16945327	257513	16984	8.26E+03	17238180
2022	0.11934495	0.002666667	10100	17028019	258769	16707	8.30E+03	17321890
2023	0.11934517	0.002666667	10100	17110711	260025	16426	8.34E+03	17405598
2024	0.11934540	0.002666667	10100	17193404	261281	16143	8.38E+03	17493304
2025	0.11934564	0.002666667	10100	17276098	262537	15855	8.42E+03	17573006
2026	0.11934588	0.002666667	10100	17358792	263793	15564	8.46E+03	17656706
2027	0.11934612	0.002666667	10100	17441488	265049	15270	8.50E+03	17740403
2028	0.11934636	0.002666667	10100	17524184	266305	14972	8.54E+03	17824098
2029	0.11934661	0.002666667	10100	17606881	267561	14671	8.58E+03	17907790
2030	0.11934686	0.002666667	10100	17689579	268817	14366	8.62E+03	17991479
2031	0.11934711	0.002666667	10100	17772278	270073	14058	8.66E+03	18075166
2032	0.11934737	0.002666667	10100	17854977	271329	13746	8.70E+03	18158850
2033	0.11934763	0.002666667	10100	17937678	272585	13431	8.74E+03	18242532
2034	0.11934790	0.002666667	10100	18020379	273842	13112	8.78E+03	18326211
2035	0.11934817	0.002666667	10100	18103082	275098	12790	8.82E+03	18409887
2036	0.11934844	0.002666667	10100	18185785	276354	12464	8.86E+03	18493561
2037	0.11934872	0.002666667	10100	18268490	277610	12135	8.90E+03	18577232
2038	0.11934900	0.002666667	10100	18351195	278866	11802	8.94E+03	18660901
2039	0.11934928	0.002666667	10100	18433901	280122	11466	8.98E+03	18744567
2040	0.11934957	0.002666667	10100	18516608	281378	11126	9.02E+03	18828231
2041	0.11934986	0.002666667	10100	18599317	282634	10783	9.06E+03	18911892
2042	0.11935016	0.002666667	10100	18682026	283890	10437	9.10E+03	18995551
2043	0.11935046	0.002666667	10100	18764736	285146	10086	9.14E+03	19079207
2044	0.11935076	0.002666667	10100	18847447	286402	9733	9.18E+03	19162861
2045	0.11935107	0.002666667	10100	18930160	287658	9376	9.22E+03	19246513
2046	0.11935138	0.002666667	10100	19012873	288914	9015	9.26E+03	19330162
2047	0.11935170	0.002666667	10100	19095588	290170	8651	9.30E+03	19413808
2048	0.11935202	0.002666667	10100	19178304	291426	8283	9.34E+03	19497452
2049	0.11935234	0.002666667	10100	19261020	292682	7912	9.38E+03	19581094
2050	0.11935267	0.002666667	10100	19343738	293938	7537	9.42E+03	19664734
2051	0.11935300	0.002666667	10100	19426457	295194	7159	9.46E+03	19748371
2052	0.11935334	0.002666667	10100	19509177	296450	6778	9.50E+03	19832006
2053	0.11935368	0.002666667	10100	19591899	297706	6393	9.54E+03	19915638
2054	0.11935403	0.002666667	10100	19674621	298962	6225	9.58E+03	19999489
2055	0.11935438	0.002666667	10100	19757345	300218	6251	9.62E+03	20083535
2056	0.11935473	0.002666667	10100	19840070	301474	6277	9.66E+03	20167583
2057	0.11935509	0.002666667	10100	19927796	302730	6303	9.70E+03	20251631
2058	0.11935545	0.002666667	10100	20005524	303986	6329	9.74E+03	20335681
2059	0.11935582	0.002666667	10100	20088253	305242	6356	9.78E+03	20419732
2060	0.11935619	0.002666667	10100	20170983	306498	6382	9.82E+03	20503784
Summe:		1933350	8.4226E+08	12798927	543544	4.10E+05	8.57942738	
							8.57943E+08	

Abbildung A.22: Kostenberechnung Variante 3 - SB1/SU1

A.2 Kostenberechnung der Varianten

Wartezeit: $\frac{t}{Fahrzeug}$		Kosten pro Jahr: Variante 3 - SB1/SU2					
		Unterhaltskosten	Reisezeitkosten	Betriebskosten	Umweltkosten	Unfallkosten	Totale Kosten pro Jahr
		K_U	K_{TT}	K_B	K_O	K_A	
2019	0.11934429	0.002666667	3600	16780119	255041	17527	8.20E+03
2020	0.11934450	0.002666667	1511350	16862809	256297	17257	8.24E+03
2021	0.11934472	0.002666667	10100	16945500	257553	16984	8.28E+03
2022	0.11934495	0.002666667	10100	17028191	258809	16707	8.32E+03
2023	0.11934517	0.002666667	10100	17110883	260065	16426	8.36E+03
2024	0.11934540	0.002666667	10100	17193576	261321	16143	8.40E+03
2025	0.11934564	0.002666667	10100	17276270	262577	15855	8.44E+03
2026	0.11934588	0.002666667	10100	17358965	263833	15564	8.48E+03
2027	0.11934612	0.002666667	10100	17441660	265089	15270	8.52E+03
2028	0.11934636	0.002666667	10100	17524356	266345	14972	8.56E+03
2029	0.11934661	0.002666667	10100	17607053	267601	14671	8.60E+03
2030	0.11934686	0.002666667	10100	17689751	268857	14366	8.64E+03
2031	0.11934711	0.002666667	10100	17772450	270113	14058	8.68E+03
2032	0.11934737	0.002666667	10100	17855150	271369	13746	8.72E+03
2033	0.11934763	0.002666667	10100	17937850	272625	13431	8.76E+03
2034	0.11934790	0.002666667	10100	18020552	273881	13112	8.80E+03
2035	0.11934817	0.002666667	10100	18103254	275137	12790	8.84E+03
2036	0.11934844	0.002666667	10100	18185958	276393	12464	8.88E+03
2037	0.11934872	0.002666667	10100	18268662	277649	12135	8.92E+03
2038	0.11934900	0.002666667	10100	18351367	278905	11802	8.96E+03
2039	0.11934928	0.002666667	10100	18434074	280161	11466	9.00E+03
2040	0.11934957	0.002666667	10100	18516781	281417	11126	9.04E+03
2041	0.11934986	0.002666667	10100	18599489	282673	10783	9.08E+03
2042	0.11935016	0.002666667	10100	18682198	283929	10437	9.12E+03
2043	0.11935046	0.002666667	10100	18764909	285185	10086	9.16E+03
2044	0.11935076	0.002666667	10100	18847620	286441	9733	9.20E+03
2045	0.11935107	0.002666667	10100	18930332	287697	9376	9.24E+03
2046	0.11935138	0.002666667	10100	19013046	288953	9015	9.28E+03
2047	0.11935170	0.002666667	10100	19095760	290209	8651	9.32E+03
2048	0.11935202	0.002666667	10100	19178476	291465	8283	9.36E+03
2049	0.11935234	0.002666667	10100	19261193	292721	7912	9.40E+03
2050	0.11935267	0.002666667	10100	19343911	293977	7537	9.44E+03
2051	0.11935300	0.002666667	10100	19426630	295233	7159	9.49E+03
2052	0.11935334	0.002666667	10100	19509350	296489	6778	9.53E+03
2053	0.11935366	0.002666667	10100	19592071	297745	6393	9.57E+03
2054	0.11935403	0.002666667	10100	19674794	299001	6225	9.61E+03
2055	0.11935438	0.002666667	10100	19757518	300257	6251	9.65E+03
2056	0.11935473	0.002666667	10100	19840243	301513	6277	9.69E+03
2057	0.11935509	0.002666667	10100	19922969	302769	6303	9.73E+03
2058	0.11935545	0.002666667	10100	20005696	304025	6329	9.77E+03
2059	0.11935582	0.002666667	10100	20088425	305281	6356	9.81E+03
2060	0.11935619	0.002666667	10100	20171155	306537	6382	9.85E+03
Summe:		1933350	8.4226E+08	12800741	543544	4.11E+05	857954E+08
857953617							

Abbildung A.23: Kostenberechnung Variante 3 - SB1/SU2

Anhang

Wartezeit: τ Fahrzeug		Kosten pro Jahr: Variante 3 - SB1/SU3						
		K _U	K _T	K _B	K _U	K _A	Totalen Kosten pro Jahr	
2019	0.11934429	0.002666667	3600	16780292	255080	17527	8.22E+03	17064723
2020	0.11934461	0.002666667	1511350	16862982	256336	17257	8.26E+03	18656189
2021	0.11934472	0.002666667	10100	16945672	257592	16984	8.30E+03	17238653
2022	0.11934495	0.002666667	10100	17028364	258848	16707	8.34E+03	17322363
2023	0.11934517	0.002666667	10100	17111056	260104	16426	8.38E+03	17406071
2024	0.11934540	0.002666667	10100	17193749	261360	16143	8.42E+03	17489777
2025	0.11934564	0.002666667	10100	17276443	262616	15855	8.47E+03	17573479
2026	0.11934588	0.002666667	10100	17359137	263872	15564	8.51E+03	17657179
2027	0.11934612	0.002666667	10100	17441833	265128	15270	8.55E+03	17740876
2028	0.11934636	0.002666667	10100	17524529	266384	14972	8.59E+03	17824571
2029	0.11934661	0.002666667	10100	17607226	267640	14671	8.63E+03	17908263
2030	0.11934686	0.002666667	10100	17689924	268896	14366	8.67E+03	17991952
2031	0.11934711	0.002666667	10100	17772623	270152	14058	8.71E+03	18075639
2032	0.11934737	0.002666667	10100	17855322	271408	13746	8.75E+03	18159323
2033	0.11934763	0.002666667	10100	17938023	272664	13431	8.79E+03	18243005
2034	0.11934790	0.002666667	10100	18020725	273920	13112	8.83E+03	18326684
2035	0.11934817	0.002666667	10100	18103427	275176	12790	8.87E+03	18410360
2036	0.11934844	0.002666667	10100	18186130	276432	12464	8.91E+03	18494034
2037	0.11934872	0.002666667	10100	18268835	277688	12135	8.95E+03	18577705
2038	0.11934900	0.002666667	10100	18351540	278944	11802	8.99E+03	18661374
2039	0.11934928	0.002666667	10100	18434246	280200	11466	9.03E+03	18745040
2040	0.11934957	0.002666667	10100	18516953	281456	11126	9.07E+03	18828704
2041	0.11934986	0.002666667	10100	18599662	282712	10783	9.11E+03	18912365
2042	0.11935016	0.002666667	10100	18682371	283968	10437	9.15E+03	18996024
2043	0.11935046	0.002666667	10100	18765081	285224	10086	9.19E+03	19079680
2044	0.11935076	0.002666667	10100	18847793	286480	9733	9.23E+03	19163334
2045	0.11935107	0.002666667	10100	18930505	287736	9376	9.27E+03	19246986
2046	0.11935138	0.002666667	10100	19013218	288993	9015	9.31E+03	19330635
2047	0.11935170	0.002666667	10100	19095933	290249	8651	9.35E+03	19414281
2048	0.11935202	0.002666667	10100	19178649	291505	8283	9.39E+03	19497925
2049	0.11935234	0.002666667	10100	19261365	292761	7912	9.43E+03	19581567
2050	0.11935267	0.002666667	10100	19344083	294017	7537	9.47E+03	19665207
2051	0.11935300	0.002666667	10100	19426802	295273	7159	9.51E+03	19748844
2052	0.11935334	0.002666667	10100	19509523	296529	6778	9.55E+03	19832479
2053	0.11935368	0.002666667	10100	19592244	297785	6393	9.59E+03	19916111
2054	0.11935403	0.002666667	10100	19674967	299041	6225	9.63E+03	19999662
2055	0.11935438	0.002666667	10100	19757693	300297	6251	9.67E+03	20084008
2056	0.11935473	0.002666667	10100	19840415	301553	6277	9.71E+03	20168056
2057	0.11935509	0.002666667	10100	19923141	302809	6303	9.75E+03	20252104
2058	0.11935545	0.002666667	10100	20005869	304065	6329	9.79E+03	20336154
2059	0.11935582	0.002666667	10100	20088598	305321	6356	9.83E+03	20420205
2060	0.11935619	0.002666667	10100	20171328	306577	6382	9.87E+03	20504257
Summe:		1933350	8.4227E+08	12802554	543544	4.12E+05	8.57964496	
							8.57964496	

Abbildung A.24: Kostenberechnung Variante 3 - SB1/SU3

A.2 Kostenberechnung der Varianten

Wartezeit: $\frac{t}{Fahrzeug}$		Kosten pro Jahr: Variante 3 - SB2/SU1					
		Unterhaltskosten	Reisezeitkosten	Betriebskosten	Umweltkosten	Unfallkosten	Totale Kosten pro Jahr
		K_U	K_{TT}	K_B	K_O	K_A	
2019	0.11934495	0.002666667	3600	17028019	258769	17786	8.30E+03
2020	0.11934540	0.002666667	1511350	17193404	261281	17595	8.38E+03
2021	0.11934588	0.002666667	10100	17358792	263793	17398	8.46E+03
2022	0.11934636	0.002666667	10100	17524184	266305	17193	8.54E+03
2023	0.11934686	0.002666667	10100	17689579	268817	16982	8.62E+03
2024	0.11934737	0.002666667	10100	17854977	271329	16763	8.70E+03
2025	0.11934790	0.002666667	10100	18020379	273842	16538	8.78E+03
2026	0.11934844	0.002666667	10100	18185785	276354	16306	8.86E+03
2027	0.11934900	0.002666667	10100	18351195	278866	16066	8.94E+03
2028	0.11934957	0.002666667	10100	18516608	281378	15820	9.02E+03
2029	0.11935016	0.002666667	10100	18682026	283890	15566	9.10E+03
2030	0.11935076	0.002666667	10100	18847447	286402	15306	9.18E+03
2031	0.11935138	0.002666667	10100	19012873	288914	15039	9.26E+03
2032	0.11935202	0.002666667	10100	19178304	291426	14764	9.34E+03
2033	0.11935267	0.002666667	10100	19343738	293938	14483	9.42E+03
2034	0.11935334	0.002666667	10100	19509177	296450	14195	9.50E+03
2035	0.11935403	0.002666667	10100	19674621	298962	13900	9.58E+03
2036	0.11935473	0.002666667	10100	19840070	301474	13597	9.66E+03
2037	0.11935545	0.002666667	10100	20005524	303986	13288	9.74E+03
2038	0.11935619	0.002666667	10100	20170983	306498	12972	9.82E+03
2039	0.11935695	0.002666667	10100	20336446	309010	12649	9.90E+03
2040	0.11935773	0.002666667	10100	20501916	311522	12319	9.98E+03
2041	0.11935853	0.002666667	10100	20667390	314034	11981	1.01E+04
2042	0.11935934	0.002666667	10100	20832871	316546	11637	1.01E+04
2043	0.11936018	0.002666667	10100	20998357	319058	11286	1.02E+04
2044	0.11936103	0.002666667	10100	21163848	321570	10928	1.03E+04
2045	0.11936191	0.002666667	10100	21329346	324082	10563	1.04E+04
2046	0.11936280	0.002666667	10100	21494850	326594	10191	1.05E+04
2047	0.11936372	0.002666667	10100	21660360	329106	9812	1.05E+04
2048	0.11936466	0.002666667	10100	21825877	331618	9426	1.06E+04
2049	0.11936562	0.002666667	10100	21991400	334130	9033	1.07E+04
2050	0.11936660	0.002666667	10100	22156930	336642	8632	1.08E+04
2051	0.11936761	0.002666667	10100	22322467	339154	8225	1.09E+04
2052	0.11936863	0.002666667	10100	22488010	341666	7811	1.09E+04
2053	0.11936964	0.002666667	10100	22653561	344178	7391	1.10E+04
2054	0.11937076	0.002666667	10100	22819120	346690	7219	1.11E+04
2055	0.11937185	0.002666667	10100	22984686	349202	7271	1.12E+04
2056	0.11937297	0.002666667	10100	23150259	351714	7323	1.13E+04
2057	0.11937412	0.002666667	10100	23315840	354226	7376	1.13E+04
2058	0.11937529	0.002666667	10100	23481430	356738	7428	1.14E+04
2059	0.11937648	0.002666667	10100	23647027	359250	7480	1.15E+04
2060	0.11937770	0.002666667	10100	23812633	361762	7533	1.16E+04
Summe:		1933350	9.2408E+08	14041124	584649	4.50E+05	9.4109E+08
							941089693

Abbildung A.25: Kostenberechnung Variante 3 - SB2/SU1

Anhang

Wartezeit: τ Fahrzeug		Kosten pro Jahr: Variante 3 - SB2/SU2					
		Unterhaltskosten K_U	Reisezeitkosten K_T	Betriebskosten K_B	Umweltkosten K_U	Unfallkosten K_A	Totale Kosten pro Jahr
2019	0.11934495	0.002666667	3600	17028191	258809	17786	8.32E+03
2020	0.11934540	0.002666667	1511350	17193576	261321	17595	8.40E+03
2021	0.11934588	0.002666667	10100	17358965	263833	17398	8.48E+03
2022	0.11934636	0.002666667	10100	17524356	266345	17193	8.56E+03
2023	0.11934686	0.002666667	10100	17689751	268857	16982	8.64E+03
2024	0.11934737	0.002666667	10100	17855150	271369	16763	8.72E+03
2025	0.11934790	0.002666667	10100	18020552	273881	16538	8.80E+03
2026	0.11934844	0.002666667	10100	18185958	276393	16306	8.88E+03
2027	0.11934900	0.002666667	10100	18351367	278905	16066	8.96E+03
2028	0.11934957	0.002666667	10100	18516781	281417	15820	9.04E+03
2029	0.11935016	0.002666667	10100	18682198	283929	15566	9.12E+03
2030	0.11935076	0.002666667	10100	18847620	286441	15306	9.20E+03
2031	0.11935138	0.002666667	10100	19013046	288953	15039	9.28E+03
2032	0.11935202	0.002666667	10100	19178476	291465	14764	9.36E+03
2033	0.11935267	0.002666667	10100	19343911	293977	14483	9.44E+03
2034	0.11935334	0.002666667	10100	19509350	296489	14195	9.52E+03
2035	0.11935403	0.002666667	10100	19674794	299001	13900	9.61E+03
2036	0.11935473	0.002666667	10100	19840243	301513	13597	9.69E+03
2037	0.11935545	0.002666667	10100	20005696	304025	13288	9.77E+03
2038	0.11935619	0.002666667	10100	20171155	306537	12972	9.85E+03
2039	0.11935695	0.002666667	10100	20336619	309049	12649	9.93E+03
2040	0.11935773	0.002666667	10100	20502088	311561	12319	1.00E+04
2041	0.11935853	0.002666667	10100	20667563	314073	11981	1.01E+04
2042	0.11935934	0.002666667	10100	20833043	316585	11637	1.02E+04
2043	0.11936018	0.002666667	10100	20998529	319097	11286	1.02E+04
2044	0.11936103	0.002666667	10100	21164021	321609	10928	1.03E+04
2045	0.11936191	0.002666667	10100	21329519	324121	10563	1.04E+04
2046	0.11936280	0.002666667	10100	21495023	326633	10191	1.05E+04
2047	0.11936372	0.002666667	10100	21660533	329146	9812	1.06E+04
2048	0.11936466	0.002666667	10100	21826049	331658	9426	1.07E+04
2049	0.11936562	0.002666667	10100	21991573	334170	9033	1.07E+04
2050	0.11936660	0.002666667	10100	22157102	336682	8632	1.08E+04
2051	0.11936761	0.002666667	10100	22322639	339194	8225	1.09E+04
2052	0.11936863	0.002666667	10100	22488183	341706	7811	1.10E+04
2053	0.11936968	0.002666667	10100	22653734	344218	7391	1.11E+04
2054	0.11937076	0.002666667	10100	22819292	346730	7219	1.11E+04
2055	0.11937185	0.002666667	10100	22984858	349242	7271	1.12E+04
2056	0.11937297	0.002666667	10100	23150432	351754	7323	1.13E+04
2057	0.11937412	0.002666667	10100	23316013	354266	7376	1.14E+04
2058	0.11937529	0.002666667	10100	23481602	356778	7428	1.15E+04
2059	0.11937648	0.002666667	10100	23647200	359290	7480	1.15E+04
2060	0.11937770	0.002666667	10100	23812805	361802	7533	1.16E+04
Summe:		1933350	9.240E+08	14042938	584649	4.51E+05	9.41101E+08
941100572							

Abbildung A.26: Kostenberechnung Variante 3 - SB2/SU2

A.2 Kostenberechnung der Varianten

Wartezeit: $\frac{t}{Fahrzeug}$		Kosten pro Jahr: Variante 3 - SB2/SU3					
		Unterhaltskosten	Reisezeitkosten	Betriebskosten	Umweltkosten	Unfallkosten	Totale Kosten pro Jahr
		K_U	K_{TT}	K_B	K_U	K_A	
2019	0.11934495	0.002666667	3600	17028364	258848	17786	8.34E+03
2020	0.11934540	0.002666667	1511350	17193749	261360	17595	8.42E+03
2021	0.11934588	0.002666667	10100	17359137	263872	17398	8.51E+03
2022	0.11934636	0.002666667	10100	17524529	266384	17193	8.59E+03
2023	0.11934686	0.002666667	10100	176899324	268896	16982	8.67E+03
2024	0.11934737	0.002666667	10100	17855322	271408	16763	8.75E+03
2025	0.11934790	0.002666667	10100	18020725	273920	16538	8.83E+03
2026	0.11934844	0.002666667	10100	18186130	276432	16306	8.91E+03
2027	0.11934900	0.002666667	10100	18351540	278944	16066	8.99E+03
2028	0.11934957	0.002666667	10100	18516953	281456	15820	9.07E+03
2029	0.11935016	0.002666667	10100	18682371	283968	15566	9.15E+03
2030	0.11935076	0.002666667	10100	18847793	286480	15306	9.23E+03
2031	0.11935138	0.002666667	10100	19013218	288993	15039	9.31E+03
2032	0.11935202	0.002666667	10100	19178649	291505	14764	9.39E+03
2033	0.11935267	0.002666667	10100	19344083	294017	14483	9.47E+03
2034	0.11935334	0.002666667	10100	19509523	296529	14195	9.55E+03
2035	0.11935403	0.002666667	10100	19674967	299041	13900	9.63E+03
2036	0.11935473	0.002666667	10100	19840415	301553	13597	9.71E+03
2037	0.11935545	0.002666667	10100	20005869	304065	13288	9.79E+03
2038	0.11935619	0.002666667	10100	20171328	306577	12972	9.87E+03
2039	0.11935695	0.002666667	10100	20336792	309089	12649	9.95E+03
2040	0.11935773	0.002666667	10100	20502261	311601	12319	1.00E+04
2041	0.11935853	0.002666667	10100	20667735	314113	11981	1.01E+04
2042	0.11935934	0.002666667	10100	20833216	316625	11637	1.02E+04
2043	0.11936018	0.002666667	10100	20998702	319137	11286	1.03E+04
2044	0.11936103	0.002666667	10100	21164193	321649	10928	1.04E+04
2045	0.11936191	0.002666667	10100	21329691	324161	10563	1.04E+04
2046	0.11936280	0.002666667	10100	21495195	326673	10191	1.05E+04
2047	0.11936372	0.002666667	10100	21660705	329185	9812	1.06E+04
2048	0.11936466	0.002666667	10100	21826222	331697	9426	1.07E+04
2049	0.11936562	0.002666667	10100	21991745	334209	9033	1.08E+04
2050	0.11936660	0.002666667	10100	22157275	336721	8632	1.08E+04
2051	0.11936761	0.002666667	10100	22322812	339233	8225	1.09E+04
2052	0.11936863	0.002666667	10100	22488356	341745	7811	1.10E+04
2053	0.11936964	0.002666667	10100	22653907	344257	7391	1.11E+04
2054	0.11937076	0.002666667	10100	22819465	346769	7219	1.12E+04
2055	0.11937185	0.002666667	10100	22985031	349281	7271	1.12E+04
2056	0.11937297	0.002666667	10100	23150604	351793	7323	1.13E+04
2057	0.11937412	0.002666667	10100	23316185	354305	7376	1.14E+04
2058	0.11937529	0.002666667	10100	23481775	356817	7428	1.15E+04
2059	0.11937648	0.002666667	10100	23647372	359329	7480	1.16E+04
2060	0.11937770	0.002666667	10100	23812978	361841	7533	1.16E+04
Summe:		1933350	9.2410E+08	14044751	584649	4.52E+05	9.4111E+08
941111451							

Abbildung A.27: Kostenberechnung Variante 3 - SB2/SU3

Anhang

Wartezeit: τ Fahrzeug		Kosten pro Jahr: Variante 3 - SB3/SU1					
		Unterhaltskosten K_U	Reisezeitkosten K_T	Betriebskosten K_B	Umweltkosten K_U	Unfallkosten K_A	Totalen Kosten pro Jahr
2019	0.11934564	0.002666667	3600	17276098	262537	18045	8.42E+03
2020	0.11934636	0.002666667	1511350	17524184	266305	17934	8.54E+03
2021	0.11934711	0.002666667	10100	17772278	270073	17812	8.66E+03
2022	0.11934790	0.002666667	10100	18020379	273842	17680	8.78E+03
2023	0.11934872	0.002666667	10100	18268490	277610	17537	8.90E+03
2024	0.11934957	0.002666667	10100	18516608	281378	17384	9.02E+03
2025	0.11935046	0.002666667	10100	18764736	285146	17221	9.14E+03
2026	0.11935138	0.002666667	10100	19012873	288914	17047	9.26E+03
2027	0.11935234	0.002666667	10100	19261020	292682	16862	9.38E+03
2028	0.11935334	0.002666667	10100	19509177	296450	16667	9.50E+03
2029	0.11935438	0.002666667	10100	19757345	300218	16462	9.62E+03
2030	0.11935545	0.002666667	10100	20005524	303986	16246	9.74E+03
2031	0.11935657	0.002666667	10100	20253714	307754	16020	9.86E+03
2032	0.11935773	0.002666667	10100	20501916	311522	15783	9.98E+03
2033	0.11935893	0.002666667	10100	20750130	315290	15535	1.01E+04
2034	0.11936018	0.002666667	10100	20998357	319058	15278	1.02E+04
2035	0.11936147	0.002666667	10100	21246596	322826	15009	1.03E+04
2036	0.11936280	0.002666667	10100	21494850	326594	14730	1.05E+04
2037	0.11936419	0.002666667	10100	21743118	330362	14441	1.06E+04
2038	0.11936562	0.002666667	10100	21991400	334130	14141	1.07E+04
2039	0.11936710	0.002666667	10100	22239697	337898	13831	1.08E+04
2040	0.11936863	0.002666667	10100	22488010	341666	13511	1.09E+04
2041	0.11937022	0.002666667	10100	22736340	345434	13179	1.11E+04
2042	0.11937185	0.002666667	10100	22984686	349202	12838	1.12E+04
2043	0.11937354	0.002666667	10100	23233049	352970	12486	1.13E+04
2044	0.11937529	0.002666667	10100	23481430	356738	12123	1.14E+04
2045	0.11937709	0.002666667	10100	23729829	360506	11750	1.15E+04
2046	0.11937895	0.002666667	10100	23978247	364274	11367	1.17E+04
2047	0.11938086	0.002666667	10100	24226685	368042	10973	1.18E+04
2048	0.11938284	0.002666667	10100	24475143	371811	10568	1.19E+04
2049	0.11938488	0.002666667	10100	24723622	375579	10153	1.20E+04
2050	0.11938698	0.002666667	10100	24972123	379347	9728	1.22E+04
2051	0.11938914	0.002666667	10100	25220645	383115	9292	1.23E+04
2052	0.11939137	0.002666667	10100	25469190	386883	8845	1.24E+04
2053	0.11939367	0.002666667	10100	25717759	390651	8388	1.25E+04
2054	0.11939603	0.002666667	10100	25966352	394419	8213	1.26E+04
2055	0.11939846	0.002666667	10100	26214970	398187	8291	1.28E+04
2056	0.11940096	0.002666667	10100	26463613	401955	8370	1.29E+04
2057	0.11940353	0.002666667	10100	26712283	405723	8448	1.30E+04
2058	0.11940617	0.002666667	10100	26960979	409491	8526	1.31E+04
2059	0.11940889	0.002666667	10100	27209704	413259	8605	1.32E+04
2060	0.11941169	0.002666667	10100	27458457	417027	8683	1.34E+04
Summe:		1933350	1.0060E+09	15283321	625754	4.90E+05	1.02429E+09
1024287411							

Abbildung A.28: Kostenberechnung Variante 3 - SB3/SU1

A.2 Kostenberechnung der Varianten

Wartezeit: $\frac{t}{Fahrzeug}$		Kosten pro Jahr: Variante 3 - SB3/SU2					
		Unterhaltskosten	Reisezeitkosten	Betriebskosten	Umweltkosten	Unfallkosten	Totale Kosten pro Jahr
		K_U	K_{TT}	K_B	K_O	K_A	
2019	0.11934564	0.002666667	3600	17276270	262577	18045	8.44E+03
2020	0.11934636	0.002666667	1511350	17524356	266345	17934	8.56E+03
2021	0.11934711	0.002666667	10100	17772450	270113	17812	8.68E+03
2022	0.11934790	0.002666667	10100	18020552	273881	17680	8.80E+03
2023	0.11934872	0.002666667	10100	18268662	277649	17537	8.92E+03
2024	0.11934957	0.002666667	10100	18516781	281417	17384	9.04E+03
2025	0.11935046	0.002666667	10100	18764909	285185	17221	9.16E+03
2026	0.11935138	0.002666667	10100	19013046	288953	17047	9.28E+03
2027	0.11935234	0.002666667	10100	19261193	292721	16862	9.40E+03
2028	0.11935334	0.002666667	10100	19509350	296489	16667	9.53E+03
2029	0.11935438	0.002666667	10100	19757518	300257	16462	9.65E+03
2030	0.1193545	0.002666667	10100	20005696	304025	16246	9.77E+03
2031	0.11935657	0.002666667	10100	20253886	307793	16020	9.89E+03
2032	0.11935773	0.002666667	10100	20502088	311561	15783	1.00E+04
2033	0.11935893	0.002666667	10100	20750302	315329	15535	1.01E+04
2034	0.11936018	0.002666667	10100	20998529	319097	15278	1.02E+04
2035	0.11936147	0.002666667	10100	21246769	322865	15009	1.04E+04
2036	0.11936280	0.002666667	10100	21495023	326633	14730	1.05E+04
2037	0.11936419	0.002666667	10100	21743290	330402	14441	1.06E+04
2038	0.11936562	0.002666667	10100	21991573	334170	14141	1.07E+04
2039	0.11936710	0.002666667	10100	22239870	337938	13831	1.09E+04
2040	0.11936863	0.002666667	10100	22488183	341706	13511	1.10E+04
2041	0.11937022	0.002666667	10100	22736512	345474	13179	1.11E+04
2042	0.11937185	0.002666667	10100	22984858	349242	12838	1.12E+04
2043	0.11937354	0.002666667	10100	23233221	353010	12486	1.13E+04
2044	0.11937529	0.002666667	10100	23481602	356778	12123	1.15E+04
2045	0.11937709	0.002666667	10100	23730002	360546	11750	1.16E+04
2046	0.11937895	0.002666667	10100	23978420	364314	11367	1.17E+04
2047	0.11938086	0.002666667	10100	24226858	368082	10973	1.18E+04
2048	0.11938284	0.002666667	10100	24475316	371850	10568	1.19E+04
2049	0.11938488	0.002666667	10100	24723795	375618	10153	1.21E+04
2050	0.11938698	0.002666667	10100	24972295	379386	9728	1.22E+04
2051	0.11938914	0.002666667	10100	25220818	383154	9292	1.23E+04
2052	0.11939137	0.002666667	10100	25469363	386922	8845	1.24E+04
2053	0.11939367	0.002666667	10100	25717932	390690	8388	1.25E+04
2054	0.11939603	0.002666667	10100	25966525	394458	8213	1.27E+04
2055	0.11939846	0.002666667	10100	26215142	398226	8291	1.28E+04
2056	0.11940096	0.002666667	10100	26463786	401994	8370	1.29E+04
2057	0.11940353	0.002666667	10100	26712455	405762	8448	1.30E+04
2058	0.11940617	0.002666667	10100	26961152	409530	8526	1.31E+04
2059	0.11940889	0.002666667	10100	27209876	413298	8605	1.33E+04
2060	0.11941169	0.002666667	10100	27458630	417066	8683	1.34E+04
Summe:		1933350	1.0060e+09	15285135	625754	4.91E+05	1.02430e+09
							1024298290

Abbildung A.29: Kostenberechnung Variante 3 - SB3/SU2

Anhang

Wartezeit: τ Fahrzeug		Kosten pro Jahr: Variante 3 - SB3/SU3						
		Unterhaltskosten K_U	Reisezeitkosten K_T	Betriebskosten K_B	Umweltkosten K_U	Unfallkosten K_A	Totale Kosten pro Jahr	
2019	0.11934564	0.002666667	3600	17276443	262616	18045	8.47E+03	17569169
2020	0.11934636	0.002666667	1511350	17524529	266384	17934	8.59E+03	19328782
2021	0.11934711	0.002666667	10100	17772623	270152	17812	8.71E+03	18079393
2022	0.11934790	0.002666667	10100	18020725	273920	17680	8.83E+03	18331251
2023	0.11934872	0.002666667	10100	18268835	277688	17537	8.95E+03	18583108
2024	0.11934957	0.002666667	10100	18516953	281456	17384	9.07E+03	18834962
2025	0.11935046	0.002666667	10100	18765081	285224	17221	9.19E+03	19086815
2026	0.11935138	0.002666667	10100	19013218	288993	17047	9.31E+03	19338666
2027	0.11935234	0.002666667	10100	19261365	292761	16862	9.43E+03	19590518
2028	0.11935334	0.002666667	10100	19509523	296529	16667	9.55E+03	19842368
2029	0.11935438	0.002666667	10100	19757690	300297	16462	9.67E+03	20094219
2030	0.11935545	0.002666667	10100	20005869	304065	16246	9.79E+03	20346070
2031	0.11935657	0.002666667	10100	20254059	307833	16020	9.91E+03	20597923
2032	0.11935773	0.002666667	10100	20502261	311601	15783	1.00E+04	20849776
2033	0.11935893	0.002666667	10100	20750475	315369	15535	1.02E+04	21101632
2034	0.11936018	0.002666667	10100	20998702	319137	15278	1.03E+04	21353489
2035	0.11936147	0.002666667	10100	21246942	322905	15009	1.04E+04	21605349
2036	0.11936280	0.002666667	10100	21495195	326673	14730	1.05E+04	21857213
2037	0.11936419	0.002666667	10100	21743463	330441	14441	1.06E+04	22109080
2038	0.11936562	0.002666667	10100	21991745	334209	14141	1.08E+04	22360951
2039	0.11936710	0.002666667	10100	22240043	337977	13831	1.09E+04	22612827
2040	0.11936863	0.002666667	10100	22488356	341745	13511	1.10E+04	22864707
2041	0.11937022	0.002666667	10100	22736685	345513	13179	1.11E+04	23116594
2042	0.11937185	0.002666667	10100	22985031	349281	12838	1.12E+04	23368487
2043	0.11937354	0.002666667	10100	23233394	353049	12486	1.14E+04	23620387
2044	0.11937529	0.002666667	10100	23481775	356817	12123	1.15E+04	23872293
2045	0.11937709	0.002666667	10100	23730174	360585	11750	1.16E+04	24124208
2046	0.11937895	0.002666667	10100	23978592	364353	11367	1.17E+04	24376132
2047	0.11938086	0.002666667	10100	24227030	368121	10973	1.18E+04	24628064
2048	0.11938284	0.002666667	10100	24475488	371889	10568	1.20E+04	24880006
2049	0.11938488	0.002666667	10100	24723967	375657	10153	1.21E+04	25131959
2050	0.11938698	0.002666667	10100	24972468	379425	9728	1.22E+04	25383922
2051	0.11938914	0.002666667	10100	25220990	383193	9292	1.23E+04	25635897
2052	0.11939137	0.002666667	10100	25469535	386962	8845	1.24E+04	25887885
2053	0.11939367	0.002666667	10100	25718104	390730	8388	1.26E+04	26139885
2054	0.11939603	0.002666667	10100	25966697	394498	8213	1.27E+04	26392191
2055	0.11939846	0.002666667	10100	26215315	398266	8291	1.28E+04	26644776
2056	0.11940096	0.002666667	10100	26463958	402034	8370	1.29E+04	26897386
2057	0.11940353	0.002666667	10100	26712628	405802	8448	1.30E+04	27150023
2058	0.11940617	0.002666667	10100	26961325	409570	8526	1.32E+04	27402687
2059	0.11940889	0.002666667	10100	27210049	413338	8605	1.33E+04	27655378
2060	0.11941169	0.002666667	10100	27458802	417106	8683	1.34E+04	27908098
Summe:		1933350	1.0060E+09	15286948	625754	4.92E+05	1.02431E+09	1024309169

Abbildung A.30: Kostenberechnung Variante 3 - SB3/SU3